

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**МАЧУЛЯНСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ**



УДК 535.015; 537.9; 662.997

**НАНОСТРУКТУРНІ МЕТАЛОДІЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ З  
ПРОГНОЗОВАНИМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Спеціальність 05.27.01 – твердотільна електроніка

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ - 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі мікроелектроніки в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

**Бурий Олег Анатолійович,**

Національний університет „Львівська політехніка”,

професор кафедри напівпровідникової електроніки;

доктор технічних наук, професор,

**Осінський Володимир Іванович,**

ПрАТ «Компанія Росток»,

головний технолог проєктів;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,

**Ходаковський Микола Іванович,**

Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України,

старший науковий співробітник відділу сенсорних пристроїв,

систем та технологій безконтактної діагностики

Захист відбудеться "29" грудня 2020 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.26.002.08 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ, проспект Перемоги, 37, навчальний корпус № 12, аудиторія 412.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розіслано "20" листопада 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради



В.Г. Артюхов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

**Актуальність теми.** На сучасному етапі розвитку технологій новий та ефективний напрямок для розширення функціональних можливостей існуючих та створення нових матеріалів із заданим комплексом властивостей відкривають нанокompозити, зокрема, наноструктурні металодіелектричні системи. Металодіелектричні наноструктурні системи включають діелектричну компоненту та металеву в нанорозмірному об'ємі. Такі структури є актуальними для застосування в різних галузях техніки, зокрема оптоелектроніка, інформатика, радіотехніка, енергетика, архітектурна оптика та інші. На їх основі представляється перспективним розробка різноманітних сучасних функціональних пристроїв таких як: широкосмугові фільтри, оптичні перемикачі, модулятори, фоточутливі матеріали; інформаційні системи передачі, зберігання, захисту та відображення інформації; селективні в оптичному діапазоні спектру плівкові структури для використання в енергозберігаючих технологіях; захисні екрануючі та радіопоглинаючі покриття (сформовані на основі мікроелектронної технології). Отже, вивчення властивостей композитних систем, що містять нанорозмірні елементи, є важливим, як з точки зору фундаментальної науки, так і практичного застосування таких структур у вирішенні практичних задач.

В роботах Виноградова А.П., Бондарь Е.О., Дмитрук М.Л., Непійко С.О., Кулюпіна Ю.А., Петрова Ю.І., Морохова І.Д., Шпака А.П., Kreibitz U., Marton J., Grangvist C., Kawabata. A. та інших вчених наведені основи теорій електромагнітних властивостей гетерогенних матеріалів та результати теоретичних і експериментальних досліджень наноструктурних композитних систем та нанорозмірних металевих частинок.

Проте, до теперішнього часу накопичений досвід досліджень та створення наноструктурних систем носить фрагментарний характер, не узагальнений і не сформований як науково-технічний напрямок розробки функціональних пристроїв з заданими електромагнітними спектральними характеристиками на основі наноструктурних металодіелектричних систем з урахуванням розмірного фактору. Як відомо, в діапазоні розмірів менше 100 нм електромагнітні параметри нанорозмірних об'ємів матеріалу є розмірно-залежними. Крім того, електромагнітні властивості реальних наноструктурних систем сильно залежать від способів їх формування і зазвичай апіорі невизначені. При цьому, в процесі формування наноструктурних шаруватих систем в них можуть утворюватися проміжні шари, які також необхідно враховувати для достовірного прогнозування електромагнітних властивостей всієї системи. Але, достовірність наявної експериментальної інформації про дисперсійні та розмірні зміни електромагнітних параметрів частинок та шарів на їх основі в оптичному діапазоні спектра викликає серйозні сумніви. Так як їх оцінюють без врахування особливостей мікроструктури, або за грубими методиками аналізу їх електромагнітних властивостей. Зокрема, розмір наночастинок оцінюється формально за умови нормального розподілу частинок за розмірами. Такий підхід цілком обґрунтований для систем зі статистично однорідною структурою та представляє найбільший інтерес для фундаментальних досліджень, але має обмежене застосування для практичних технічних рішень. На

практиці для більшості прикладних застосувань наноструктурних систем характерна статистично неоднорідна структура,

Відсутність достовірної інформації про електромагнітні параметри матеріалів в нанорозмірних об'ємах не дозволяє достовірно прогнозувати властивості новостворених наноструктурних систем і проводити оптимізацію вже відомих. Все це надає першочергове значення розробці ефективних і доступних для практичного використання методів визначення достовірної експериментальної інформації про електромагнітні властивості наноструктурних матеріалів.

Важливим завданням також є комплексне дослідження впливу технологічних режимів формування нанорозмірних компонент на властивості, склад, структуру плівкових наноструктурних систем. Крім того, інтерес до дослідження наноструктурних систем стимульований потребою в розробці прийнятних для масового виробництва функціональних пристроїв. Найбільш актуальні завдання в цьому відношенні полягають в зниженні їх вартості (при збереженні їх функціональної ефективності) за рахунок зменшення числа проміжних технологічних операцій при виготовленні, а також у збільшенні терміну служби компонентів, що використовуються в традиційних системах. Ці актуальні завдання можуть бути вирішені шляхом удосконалення існуючих і розробки нових наноструктурних матеріалів для різного функціонального призначення, оптимізації електромагнітних та мікроструктурних параметрів складових компонентів та вдосконалення технології виготовлення.

У відповідності з цим, розробка методів для оцінки, дослідження та аналізу особливостей зміни електромагнітних властивостей матеріалів в нанорозмірних об'ємах є актуальною науково-прикладною проблемою і важливою складовою загально-наукової проблеми створення функціональних елементів із прогнозованим комплексом електромагнітних параметрів на основі наноструктурних систем. Таким чином, багаторічний досвід багатопланових досліджень в означеному напрямку обумовили постановку даної дисертаційної роботи спрямованої на вирішення вказаної науково-прикладної проблеми.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дослідження виконані за темою дисертаційної роботи проводилися відповідно до основних наукових напрямків кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" та до державних науково-технічних програм пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки, зокрема в рамках наступних НДР: "Наноматеріали для електронних схем високої інтеграції", № держреєстрації 0109U005499 на підставі Наказу Міністерства освіти і науки України від 02.04.2009 р. № 301; "Дослідження ролі дрібнозернистої фази в селективних покриттях", державний реєстраційний номер № 01860002305 Інститут хімії поверхні; "Розробка лабораторних методик дослідження оптичних параметрів покриттів, одержаних термічним та газофазним осадженням", державний реєстраційний номер № 02870034949 СКТБ ВХП; "Захист чутливого електронного обладнання від впливу електромагнітних завад із застосуванням матеріалів, виготовлених за нанотехнологіями", державний реєстраційний номер № 0109U004190 на підставі Наказу Міністерства освіти і науки

України від 18.02.2009 № 139; "Наноструктурні плівкові металодіелектричні системи", державний реєстраційний номер № 0113U005498; "Функціональні пристрої на основі композитних наноструктур", державний реєстраційний номер № 0116U008156; "Електронні властивості та елементи симетрії нанорозмірних твердих тіл", державний реєстраційний номер № 0118U001522. Частина результатів досліджень електрофізичних параметрів метал-полімерних композитів, представлених в роботі, отримані за підтримки Чеського Наукового фонду (проект P204/12/0232), Інститут фізики ASCR, Прага.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка і застосування експериментально-аналітичних методів для дослідження, аналізу металодіелектричних наноструктурних систем та їх нанорозмірних компонент і створення на цій основі функціональних елементів із прогнозованим комплексом електромагнітних властивостей.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні основні задачі:

- Провести комплексний аналіз фізико-технологічних, аналітично-обчислювальних основ та теоретичних, експериментальних досліджень електромагнітних властивостей металодіелектричних наноструктурних систем та їх нанорозмірних компонент.
- Визначити системні підходи, способи опису електромагнітного відгуку різних за структурою, морфологією металодіелектричних наноструктурних систем з урахуванням розмірних залежностей електромагнітних параметрів їх складових компонентів.
- Розвинути моделі електромагнітного відгуку двовірних (моношарів) та трьохвірних металодіелектричних наноструктурних систем з урахуванням статистики розподілу нанокомпоненти за розмірами.
- Розробити експериментально-аналітичні методи визначення електромагнітних параметрів нанорозмірних металевих частинок з урахуванням функції їх розподілу за розмірами.
- Розробити методики технологічних процесів отримання нанорозмірних металевих плівок з розмірами частинок меншими 10 нм, діелектричних плівок оксинітриду алюмінію, полімерних композитів та провести комплексне експериментальне дослідження мікроструктурних, оптичних, електрофізичних параметрів.
- Вивчити вплив умов формування, фізико-технологічних параметрів на мікроструктуру, склад, електрофізичні параметри, функціональні властивості металодіелектричних наноструктурних систем з метою застосування в технологічних процесах формування функціональних структур.
- Провести експериментальні та теоретичні дослідження розмірних та спектральних залежностей електромагнітних параметрів нанорозмірних компонентів металодіелектричних систем у ближньому ультрафіолетовому, видимому, ближньому інфрачервоному діапазоні спектру.

- Розробити наноструктурні металодіелектричні системи та практичні рекомендації по їх застосуванню в якості функціональних елементів з прогнозованими спектральними характеристиками.

*Об'єкт дослідження* – взаємодія електромагнітного випромінювання з наноструктурними металодіелектричними матеріалами.

*Предмет дослідження* – електромагнітні властивості металодіелектричних наноструктурних систем та їх нанорозмірних компонент, зокрема міді, нікелю та хрому. Вибір матеріалів обумовлений можливостями їх прикладного та функціонального застосування.

**Методи досліджень.** Експериментальні дані одержані з використанням стандартних методик та методів досліджень: просвічувальної, растрової електронної мікроскопії, рентгеноструктурного аналізу, Оже-спектроскопії, інфрачервоної спектроскопії, діелектричної та магнітної спектроскопії, оптичної спектрофотометрії, еліпсометрії. Аналіз та узагальнення результатів досліджень проведено на основі чисельного моделювання, чисельних методів розв'язку математичних задач, оптимізації та методів статистичного аналізу.

Достовірність та обґрунтованість результатів досліджень обумовлена великим обсягом експериментальних даних, комплексним характером досліджень з використанням сучасних методів та кореляцією аналітичних розрахунків і експериментальних даних, а також узгодженням з результатами досліджень інших авторів.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

У дисертаційній роботі вперше одержані та узагальнені такі наукові результати:

- Запропоновано методи визначення електромагнітних параметрів нанорозмірних компонент системи по спектроскопічним та структурним дослідженням тривимірних одношарових та багатшарових систем на основі розв'язку зворотних задач, зокрема модифікованої теорії Бруггемана та феноменологічної теорії, що дозволило врахувати морфологію, структуру реальних наноструктурних систем, статистику розподілу нанорозмірних частинок за розмірами в неоднорідних системах.

- Удосконалено метод визначення експериментальних значень питомої комплексної поляризованості нанорозмірних частинок в двовимірних металодіелектричних системах із неоднорідною структурою по спектрофотометричним, електронно-мікроскопічним дослідженням шляхом урахування функції розподілу частинок за розмірами. Показано, що застосування методу в системах зі статистично неоднорідною структурою дозволяє досягти підвищення точності оцінки експериментальних значень електромагнітних параметрів.

- Визначені експериментальні значення електромагнітних параметрів (питомої комплексної електричної поляризованості, комплексної діелектричної проникності та показника заломлення і поглинання) нанорозмірних частинок міді, нікелю та хрому з розміром від 1 нм до 10 нм в системах зі статистично неоднорідною

структурою в ближньому ультрафіолетовому, видимому, ближньому інфрачервоному діапазонах спектру, що використано при розробці металодіелектричних наноструктур.

- Встановлено аналітичні спектральні і розмірні залежності питомої комплексної електричної поляризованості та комплексної діелектричної проникності нанорозмірних частинок досліджених матеріалів у спектральному інтервалі від 0,2 до 1,1 мкм, що визначають експериментально встановлені особливості їх оптичних властивостей.

- Експериментально встановлено для нанорозмірних частинок міді з розмірами менше 10 нм в системах зі статистично неоднорідною структурою збільшення значень дійсної та уявної частин питомої комплексної поляризованості, параметрів поглинання і водночас зниження значень їх комплексної діелектричної проникності, електронної провідності до двох порядків величини при зменшенні розміру частинок та в порівнянні із значеннями відповідних металів у макроскопічних об'ємах. Виявлено, що в досліджуваних нанорозмірних частинках на відміну від металів у макроскопічних об'ємах поглинання в ближній інфрачервоній області спектру значно послаблене та обумовлене внутрішньозонними переходами електронів провідності, що враховано під час створення селективних структур.

- Встановлено, що експериментальні розмірні залежності електромагнітних параметрів нанорозмірних частинок міді з розміром менше 10 нм не можуть бути обумовлені виключно використанням теорій класичного або квантового розмірних ефектів в дипольному наближенні. Експериментально визначено розмірні зміни Фур'є-компонент псевдопотенціалу нанорозмірних частинок міді.

- Запропоновано аналітичну модель оптичної провідності та питомого поглинання за областю їх міжзонного поглинання з урахуванням впливу розміру частинок на електронні та фононні стани в ній.

- Показано вплив на оптичні властивості шаруватих металодіелектричних систем проміжних нанокмпозитних шарів, які виникають в процесі їх формування, що важливо для створення селективних структур з енергозберігаючими властивостями на їх основі.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Результати роботи є теоретичною та експериментальною базою для розробки металодіелектричних наноструктурних систем із прогнозованими властивостями та створення на їх основі функціональних елементів для застосування в оптоелектроніці, енергозберігаючих та інформаційних технологіях.

Розвинені в дисертації методи визначення електромагнітних параметрів наноструктурних одношарових і багатшарових покриттів дозволили одержати експериментальні значення електромагнітних параметрів нанорозмірних шарів і окремих частинок металів та розробити на їх основі селективні металодіелектричні системи. А також можуть сприяти розвитку досліджень, таких напрямків, як наприклад, фізична оптика, прикладна електродинаміка наноматеріалів та покриттів.

Запропонована методологія є основою для фундаментальних досліджень нанорозмірних структур та удосконалення технології формування наноструктурних систем. Знання особливостей електромагнітних властивостей реальних

наноструктурних систем та їх залежності від морфологічної структури нанорозмірних компонент, розмірного фактору та технологічних режимів процесу їх формування забезпечує створення наноструктурних систем із прогнозованими електромагнітними параметрами.

На підставі одержаної в роботі експериментальної інформації про залежності між оптичними характеристиками металодіелектричних шарів та їх структурними параметрами оптимізовано технологічний процес синтезу енергоефективних покриттів із прогнозованими властивостями, виготовлених методом магнетронного розпилення на постійному струмі. Розроблено технологічний процес для малосерійного виробництва на базі модернізованого технологічного вакуумного обладнання УВМ-15 по нанесенню металодіелектричних покриттів з нанорозмірною металевою фазою на об'ємні та плоскі вироби великої площі.

Розроблено нові металодіелектричні наноструктурні покриття на основі оксинітриду алюмінію з нанорозмірними включеннями металів та сформовано селективні елементи з енергозберігаючими, екрануючими властивостями та поліпшеними експлуатаційними характеристиками.

Запропоновані та розроблені в дисертації рішення являються базою нових технологій для аналітико-технологічних комплексів, які дозволяють не лише проводити достовірні дослідження, оцінку електромагнітних параметрів наноструктурних систем, а також тестування технологічного устаткування в процесі виробництва.

Результати роботи впроваджено у навчальному процесі на кафедрі мікроелектроніки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". Теоретичні і практичні результати роботи використовуються в лекційних і практичних заняттях з дисциплін «Твердотільна електроніка», «Діелектричні прилади і пристрої», «Технологічні основи електроніки», «Технологія напівпровідникових приладів та інтегральних схем», «Елементний і структурний аналіз», а також під час виконання кваліфікаційних робіт студентів (магістрів, PhD) кафедри. Нові рішення захищені патентами України № 108530, № 97514.

**Особистий внесок здобувача.** У дисертаційній роботі узагальнені результати експериментальних і теоретичних багаторічних досліджень, виконаних автором особисто. В роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в формуванні та обґрунтуванні напрямку досліджень, постановці задач, розробці технологічних процесів, моделей, виконанні розрахунків, експериментальних досліджень, аналіз та інтерпретації одержаних результатів та їх узагальнення, підготовці й написанні наукових публікацій. Зокрема, у роботах [13, 21, 23, 29 - 31, 33, 46 - 48, 56, 59, 63, 66, 70, 76] (список опублікованих праць за темою дисертації) здобувачу належить постановка задачі, аналіз й інтерпретація результатів досліджень. У роботах [4, 43, 77, 80] здобувачем обґрунтовано доцільність врахування розмірних залежностей оптичних параметрів для оцінки оптичних параметрів металевих нанорозмірних частинок. У роботах [3, 6, 36 - 40, 62] підготовлені тестові зразки та проведено аналіз, узагальнення отриманих результатів. У роботах [7, 44, 73] здобувачем виготовлено тестові зразки плівкових



структур, що екранують НВЧ електромагнітне випромінювання і є прозорими у видимому діапазоні спектра та проведено порівняльний аналіз експериментальних і теоретичних досліджень. У роботах [8, 27, 60, 71, 74, 75] здобувачем сформульовано проблему та вдосконалено модель електромагнітного відгуку одношарових нанокомпозитних покриттів, з урахування особливостей електромагнітних і мікроструктурних параметрів їх нанорозмірних компонентів. У роботах [11, 15, 17, 18, 35, 57] здобувачем обґрунтовано основні засади формування наноструктурних матеріалів для електромагнітного екранування з врахуванням їх особливостей. У роботах [58, 65, 72] здобувачем проведено моделювання спектральних характеристик електромагнітного відгуку наноструктурних систем, аналіз та узагальнення одержаних результатів. У роботах [14, 16, 19, 32, 41, 45, 49 - 54] здобувачеві належить постановка задачі, виготовлення та дослідження тестових зразків, аналіз й інтерпретація результатів досліджень. У роботах [10, 24, 26, 55, 61] здобувачем проведено аналіз та узагальнення отриманих результатів. У роботах [9, 12, 22, 34, 42, 64, 67 - 69, 79] здобувачем проведено аналіз та узагальнення результатів моделювання спектральних характеристик електромагнітного відгуку оптичних фільтрів на основі наноструктурних металодіелектричних систем. У роботах [25, 81] здобувачем обґрунтовано доцільність врахування мікроструктури проміжних шарів для оцінки селективних властивостей нанокомпозитних металодіелектричних структур в оптичному діапазоні спектру.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідались та обговорювались на 46 міжнародних науково-технічних конференціях, симпозіумах і семінарах, в тому числі: XXVII міжнародній науково-технічній конференції “Проблемы электроники” (м. Київ, 2007 р.); XII, XIII, XIV, XV, XVI міжнародній науково-технічній конференції “Силовая электроника та енергоефективність” (м. Алушта, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 pp.); XII міжнародній науково-технічній конференції “Системный анализ и информационные технологии SAIT 2010” (м. Київ, 2010 р.); міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми сучасної електроніки” (м. Київ, 2006, 2010, 2011 pp.); 20th International Symposium EMC Europe 2010 (Wroclaw, Poland, 2010); XX, XXI, XXII, XXIII міжнародна Кримська конференція “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (м. Севастополь, 2010, 2011, 2012, 2013 pp.); VI, VII міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» (сmt. Лівадія, 2010, 2011 pp.); IV міжнародна наукова конференція “Функциональная база нанoeлектроники” (сmt. Кацівелі, 2011); VIII, IX Міжнародна наукова конференція “Функциональная база нанoeлектроники” (м. Одеса, 2015, 2017 pp.); VIII науково-практична конференція “Перспективні напрямки сучасної електроніки” (м. Київ, 2014 р.); IV міжнародна науково-практична конференція “Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки” (Чернівці, 2014 р.); V міжнародна науково-практична конференція “Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах” (м. Чернівці, 2016р.). VI міжнародній науково-практичній конференції I Міжнародний симпозіум “Практичне

застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях” (м.Чернівці, 2017 р.); VII міжнародній науково-практичній конференції “Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах” (м. Чернівці, 2018 р.); V міжнародній науково-практичній конференції “Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка”, (м. Кременчук, 2018); XVII, XVIII, XIV Міжнародна конференція з математичного моделювання (м. Херсон, 2016, 2017, 2018, 2019 pp.); 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2009) “Technology Integration, the path to New Solutions in the Modern Electronics” (Brno, Czech, 2009); 33rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2010), (Warsaw, Poland, 2010); 34rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2011 High Tatras), (Tatras, Slovakia, 2011); X, XI, XII, XIII, XIV міжнародній науково-технічній конференції “Electronics and applied physics” (м.Київ, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 pp.); 20th International Conference on Composite Materials (Copenhagen, Denmark, 2015); IEEE Progress in Electromagnetics Research Symposium (Stockholm, Sweden, 2013); 35th International Spring Seminar on Electronics Technology (Bad Aussee, Austria, 2012); 29th, 30th, 31st, 32nd, 33rd, 34th, 35th, 36th, 37th, 38th, 39th міжнародній науково-технічній конференції “Electronics and Nanotechnology (ELNANO)” (м. Київ, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 pp.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 81 науковій праці, у тому числі 32 статті у наукових фахових виданнях (з них 3 статті у виданнях іноземних держав, 22 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 1 стаття в інших наукових виданнях, 2 патенти України на корисну модель та 46 тез доповідей в збірниках матеріалів наукових конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів, загальних висновків, списку джерел використаної літератури та додатків. Робота містить 107 ілюстрацій, 20 таблиць, бібліографічний список використаних джерел з 452 найменувань вітчизняної та зарубіжної літератури, 3 додатків доповнювальних матеріалів. Основна частина дисертаційної роботи викладена на 296 сторінках. Загальний обсяг роботи складає 395 сторінок.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та основні задачі досліджень, визначено наукову новизну, показано практичне значення отриманих результатів, вказаний зв’язок роботи з науковими програмами, темами. Наведено інформацію про апробацію та публікацію результатів досліджень за темою дисертаційної роботи.

**У першому розділі** наведено результати аналізу сучасних підходів та основних положень до опису електромагнітних (ЕМ) властивостей матеріалів в макроскопічному об’ємі та металевих нанорозмірних частинок (НРЧ) і наноструктурних систем на їх основі. Встановлено, що складність розробки, оптимізації металодіелектричних наноструктурних систем (МДНС) із прогнозованими властивостями для застосування в функціональних елементах

різного прикладного призначення обумовлена наявністю ряду проблем *фундаментального, методологічного та прикладного* характеру.

- Зокрема, проблема обмеженості достовірної інформації про електромагнітні властивості нанорозмірних частинок матеріалу. Відомі теорії електромагнітних властивостей нанорозмірних частинок вкрай суперечливі і не однозначно описують розмірні залежності їх параметрів. Водночас, експериментальна інформація про розмірні та частотні залежності електромагнітних параметрів нанорозмірних об'ємів матеріалу обмежена, як за матеріалами частинок так і по спектральному діапазону, або неоднозначно представлена для випадку ряду припущень без врахування реальної мікроструктури нанодисперсних систем. Тому, як правило, прикладні та фундаментальні завдання розробки наноструктурних систем і оптимізації характеристик функціональних пристроїв, створених на їх основі, вирішуються за умови тотожності значень параметрів нанорозмірних компонентів відповідним параметрам матеріалу в макроскопічних об'ємах. Однак, між розрахованими таким чином і реальними характеристиками наноструктурних систем є значні розбіжності, що ставить під сумнів питання про адекватність їх прогнозування.

- Суттєвою проблемою є визначення і прогнозування електромагнітних параметрів нанорозмірних компонентів в реальних наноструктурних системах. Це обумовлено тим, що електромагнітні параметри нанорозмірних частинок недоступні безпосередньому виміру, а оцінюють їх, як правило, за допомогою досліджень відгуку системи (ансамблю частинок) на зовнішній електромагнітний вплив. При цьому відсутні методи, які коректно враховують реальну морфологію та структуру нанодисперсних систем. Тому одним із важливих завдань є розробка нових та вдосконалення вже існуючих методів визначення електромагнітних параметрів нанорозмірних компонентів в реальних одношарових та багатшарових наноструктурних системах зі статистично неоднорідною структурою без додаткових обмежень щодо неоднорідності їх мікроструктури.

- Проблема відсутності достовірної інформації про електромагнітні властивості реальних нанорозмірних компонент матеріалів не дозволяє достовірно прогнозувати властивості новостворених наноструктурних систем і функціональних елементів на їх основі та проводити оптимізацію вже відомих. Не вирішені питання виробництва таких пристроїв з точки зору зниження вартості, зменшення числа технологічних операцій, збільшення надійності та терміну їх використання. При цьому не вивчений аспект впливу мікроструктури нанодисперсних систем на їх електромагнітні параметри.

На основі виконаного аналізу сформульовані мета, завдання, проведені дослідження, спрямовані на підвищення достовірності оцінки електромагнітних параметрів наноструктурних систем та їх нанорозмірних компонент та створені на цій основі функціональні елементи із прогнозованим комплексом електромагнітних властивостей та удосконалено технологію їх формування.

**Другий розділ** присвячено опису подальшого розвитку експериментально-аналітичного підходу до визначення експериментальних значень електромагнітних параметрів нанорозмірних компонент в наноструктурних системах, який направлений на врахування особливостей реальної мікроструктури та підвищення

достовірності оцінки електромагнітних параметрів їх нанорозмірних компонент та сформованих на їх основі металодіелектричних систем.

Для однозначного аналізу та розробки моделей опису електромагнітних параметрів металодіелектричних наноструктурних систем, враховуючи їх складну та різноманітну структуру (різняється топологією, морфологією, шаруватістю) встановлено класифікацію та критерії для їх систематизації. Металодіелектричні наноструктурні системи виділено в наступні групи: одновимірні, двовимірні, трьохвимірні.

Відповідно до встановлених видів наноструктурних систем розвинуто моделі опису електромагнітного відгуку нанодисперсних систем шляхом врахування їх реальної мікроструктури та морфології.

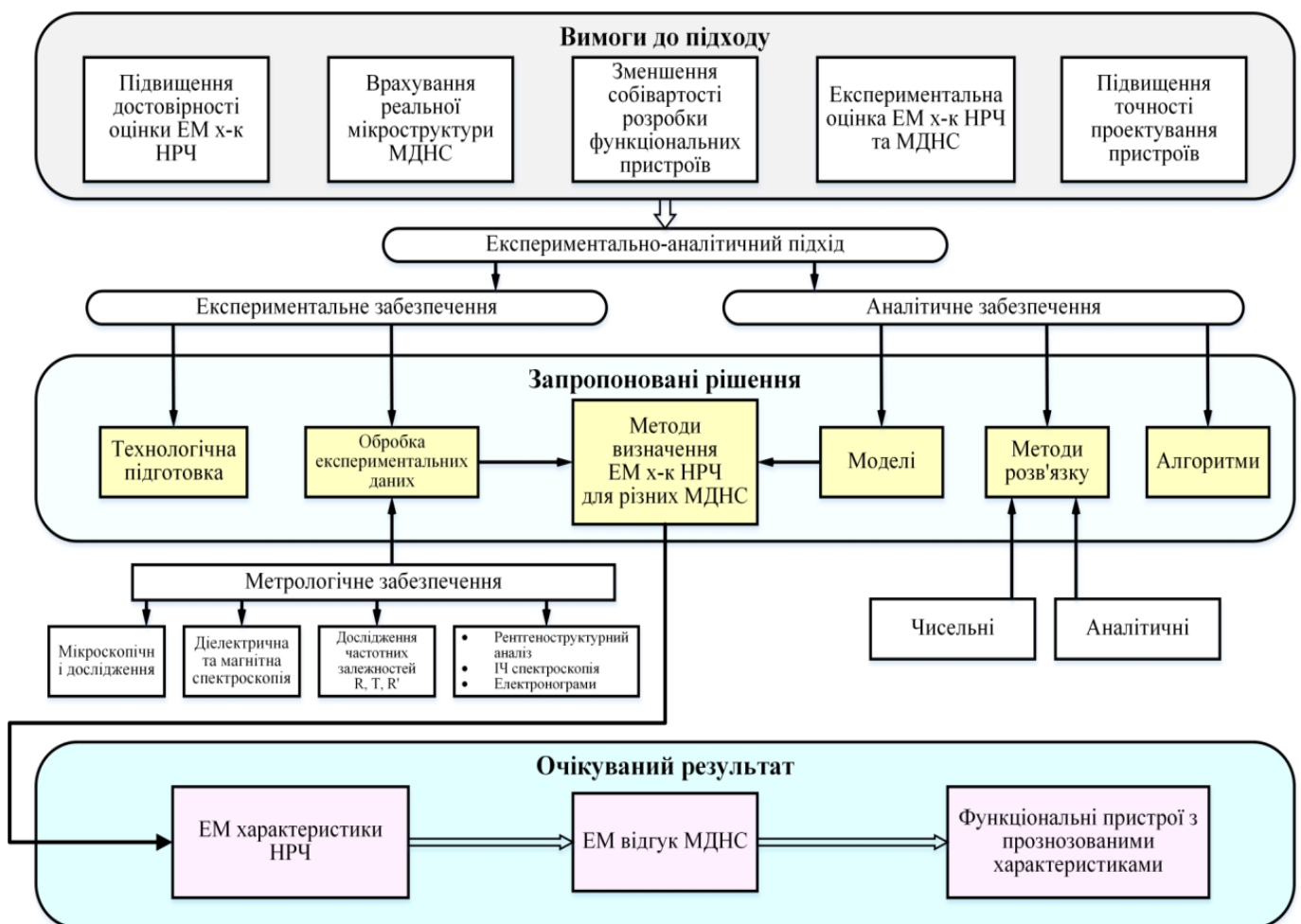


Рис. 1. Загальна блок-схема експериментально-аналітичного підходу

Зокрема, вдосконалено модель опису електромагнітного відгуку двовимірної металодіелектричної наноструктурної системи з статистично неоднорідною структурою шляхом врахування статистики розподілу нанорозмірних частинок за розмірами. Модель встановлює взаємозв'язок між енергетичними параметрами (коефіцієнт пропускання електромагнітного випромінювання  $T$ , коефіцієнт відбивання зі сторони плівки  $R$  та підкладки  $R'$ ), з параметрами структури системи з статистично неоднорідної структурою і електромагнітним параметром

наночастинки (питомою комплексною електричною поляризованістю  $\alpha = \alpha_1 - i\alpha_2$ ). Математична модель заснована на основі спектрофотометричної системи рівнянь Розенберга, яка розвинута для опису оптичних властивостей двовірних моношарів частинок металу (однорідних за розміром) на прозорій в оптичному діапазоні спектру діелектричній підкладці. Запропоновано обчислювальний алгоритм оцінки структурних параметрів металодіелектричної нанодисперсної систем з статистично неоднорідною структурою на основі критерію узгодження Пірсона.

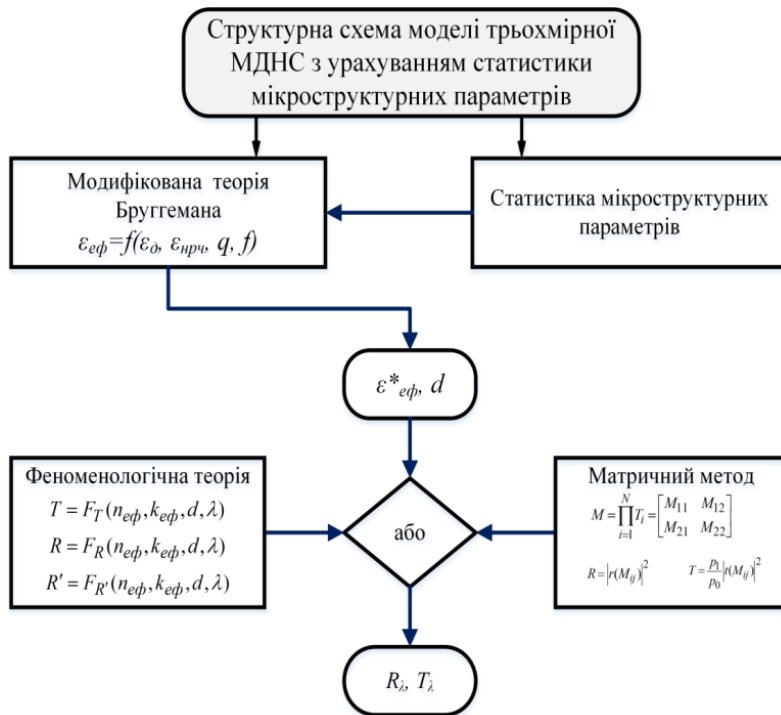


Рис. 2. Структурна схема моделі трьохвимірної наноструктурної системи

діелектричним середовищем, в якому вони зосереджені ( $\epsilon_m$ ), розміром ( $D_0$ ), концентрацією ( $N_V$ ) частинок та товщиною шарів ( $d_i$ ). Мікроструктура наноструктурних шарів із статистично неоднорідною структурою оцінюється з урахуванням статистичного аналізу розподілу нанорозмірних частинок за розмірами

Перевагою представленої моделі є те, що вона дозволяє оцінити відгук на електромагнітне збурення одношарових і багатошарових трьохвимірних металодіелектричних наноструктурних систем. Зокрема, як у випадку вільних від підкладки шарів (класична система рівнянь феноменологічної теорії електромагнітних властивостей плівок), так і шаруватих структур на підкладці (матричний метод).

Загальна методика аналізу електромагнітних параметрів нанорозмірних компонент наноструктурної системи в рамках запропонованого підходу для різних типів систем складається з експериментального і аналітичного блоків.

Блок метрологічного забезпечення заснований на використанні стандартних експериментальних методів дослідження мікроструктури та електромагнітного відгуку наноструктурних металодіелектричних систем, основні з яких вказані на

Розроблена модель опису електромагнітного відгуку тривимірної металодіелектричної наноструктурної системи з урахуванням статистики розподілу нанорозмірних частинок за розмірами. Модель встановлює зв'язок електромагнітних характеристик компонент трьохвірних наноструктурних систем та їх структурних параметрів з відгуком системи ( $T$ ,  $R$ ,  $R'$ ) на електромагнітне збурення. Зокрема, у випадку металодіелектричних шарів на основі нанорозмірних металевих частинок встановлено взаємозв'язок  $T$ ,  $R$ ,  $R'$  з електромагнітними параметрами частинки ( $\epsilon_i$ ),

блок-схемі (рис.1). Аналітичний блок ґрунтується на розв'язку зворотних задач систем рівнянь закладених у математичні моделі, які описують електромагнітний відгук наноструктурної системи.

На основі вдосконалених моделей запропоновано експериментально-аналітичні методи визначення значень експериментальних електромагнітних параметрів нанорозмірних компонент в наноструктурних металодіелектричних системах з різною структурою та морфологією.

Відзначено, що необхідність розробки та використання різних методів визначається також особливостями проведення експериментально-аналітичних досліджень на наноструктурних системах. А саме:

- різні за структурними параметрами системи не можуть бути описані одним аналітичним апаратом (моделлю);
- для проведення експерименту в широкому діапазоні спектру необхідно залучати різні зразки наноструктурних систем, тому що для спектрофотометричних досліджень характерна висока чутливість до таких структурних параметрів, як товщина зразка, концентрація нанорозмірних частинок та інші.

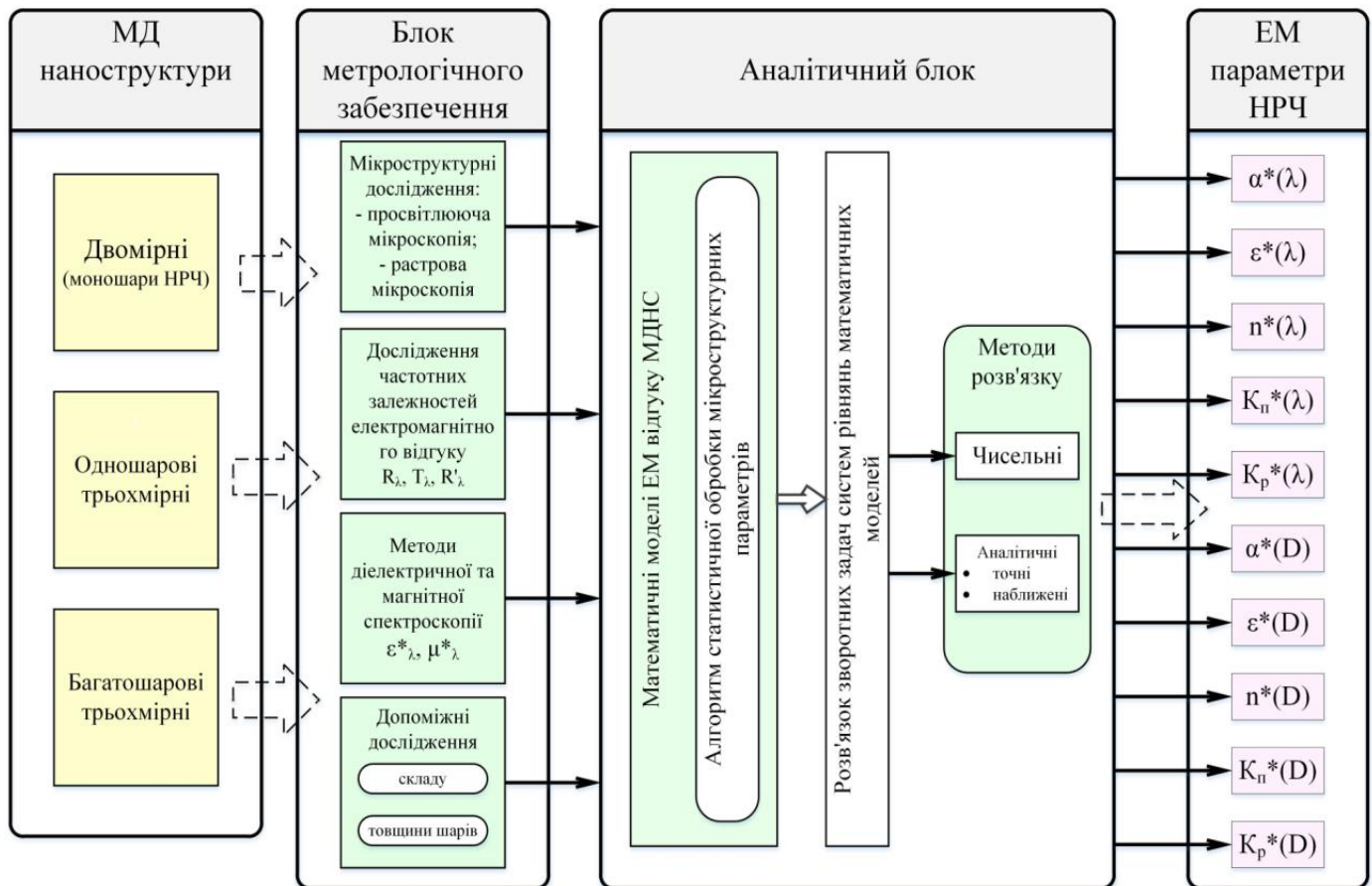


Рис. 3 Блок-схема методології експериментально-аналітичного аналізу електромагнітних характеристик нанорозмірних компонент

Удосконалений експериментально-аналітичний метод визначення експериментальних значень електромагнітних параметрів нанорозмірних частинок для систем зі статистично неоднорідною структурою по спектрофотометричних і електронно-мікроскопічних вимірах на двовимірних металодіелектричних



наноструктурних системах і аналітичного розв'язку зворотної задачі системи спектрофотометричних рівнянь Розенберга з урахуванням аналізу функції розподілу частинок за розмірами. Показано, що застосування розробленого методу в системах зі статистично неоднорідною структурою дозволяє досягти підвищення точності визначення експериментальних значень електромагнітних параметрів. Встановлено, що через високу прозорість і низьке відбивання острівцевих металевих плівок в інфрачервоному діапазоні спектру застосування запропонованого на основі теорії Розенберга методу визначення експериментальних значень питомої комплексної електричної поляризованості нанорозмірних сферичних металевих частинок обмежено інтервалом спектру  $\lambda=0,2-1,2$  мкм.

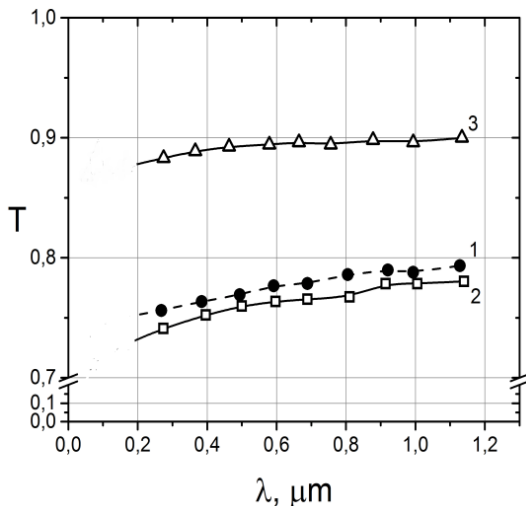


Рис. 4. Спектральна залежність коефіцієнта пропускання статистично неоднорідної системи Cr-SiO<sub>2</sub>: 1 – експериментальна крива; 2 – розрахована за значеннями оптичних параметрів частинок хрому визначених за гіпотезою логарифмічно-нормального розподілу; 3 – за гіпотезою нормального розподілу

Розроблено метод визначення комплексної діелектричної проникності та комплексної магнітної проникності нанорозмірних компонентів на підставі експериментальних вимірів спектрів ефективної комплексної діелектричної проникності, ефективної комплексної магнітної проникності, електронно-мікроскопічних досліджень досліджень на тривимірних наноструктурних системах і застосуванні модифікованої теорії Бруггемана. Отримано аналітичні алгоритми рішення зворотної задачі для систем рівнянь теорії Бруггемана. Відзначено, що метод забезпечує можливість визначення експериментальних значень електромагнітних характеристик нанорозмірних металевих частинок в широкому діапазоні спектру, який визначається можливостями експериментальної діелектричної та магнітної спектроскопії.

Запропоновано метод визначення комплексної діелектричної проникності нанорозмірних частинок на підставі спектрофотометричних вимірів та електронно-мікроскопічних досліджень на одношарових

структурах тривимірних наноструктурних систем і застосуванні модифікованої теорії Бруггемана. Особливістю даного методу є те, що окрім рішення зворотної задачі теорії Бруггемана необхідно вирішувати ще зворотну задачу феноменологічної теорії оптичних властивостей тонких плівок.

Відзначено, що в реальних наноструктурних шаруватих системах мікроструктура залежить від багатьох факторів, а саме – матеріалу компонентів, методів і режимів формування шарів, від їх товщини та мікроструктури підкладки. Крім того, в процесі виготовлення шаруватих систем між різними шарами в ній в результаті дифузійних процесів і дії атмосферних факторів можуть утворюватися бар'єрні або поверхневі шари, що змінюють їх характеристики Інформація про реальні експериментальні електромагнітні параметри нанорозмірних компонент в

металодіелектричних наноструктурних системах дозволяє адекватно проводити прогнозування їх електромагнітних властивостей.

З метою врахування особливостей формування нанорозмірних шарів в складі шаруватих металодіелектричних систем, що впливають на їх оптичні та електрофізичні параметри, запропоновано експериментально-аналітичний метод визначення електромагнітних параметрів нанорозмірних частинок та шарів у складі багатошарової системи на підставі спектрофотометричних вимірів та електронно-мікроскопічних досліджень багатошарової наноструктурної системи (моношар наночасток або тривимірного нанодисперсного композитного шару між діелектричними шарами).

На основі зворотних задач теорії Бруггемана та рівнянь матриць переносу для реалізації методу розроблений відповідний алгоритм. Встановлено, що зворотна задача матричних рівнянь, як і в випадку феноменологічної теорії для нанорозмірних плівок є математично некоректною. Це виражається в крайній нестійкості (чутливості) результатів її рішення до похибок вимірів  $T$  і  $R$  і, як наслідок, у неможливості рішення даної системи рівнянь звичайними чисельними методами. В якості методу регуляризації рішення зворотної задачі застосовано метод безперервного диференційного спуску, суть якого полягає в заміні початкової математичної некоректної системи рівнянь еквівалентною їй системою диференціальних рівнянь безперервного спуску. Остання вирішується чисельним методом Рунге-Кутта.

Представлені результати апробації розвинених експериментально-аналітичних методів визначення експериментальних значень електромагнітних параметрів нанорозмірних компонент на дво- і тривимірних наноструктурних системах. Обґрунтована достовірність отриманих результатів експериментально-аналітичними методами електромагнітних параметрів нанорозмірних металевих частинок наявністю виправданих асимптотик розмірних змін цих параметрів в нанорозмірних і макроскопічних діапазонах розмірів частинок, а також досягненням при використанні цих даних високої точності прогнозування оптичних параметрів металодіелектричних наноструктурних систем (рис. 5). З метою оцінки впливу неоднорідності морфологічної мікроструктури на достовірність визначення електромагнітних параметрів нанорозмірних частинок виконано розрахунки оптичних параметрів спектральних та розмірних залежностей частинок (нікелю, міді) з урахуванням в різних гіпотезах виду статистичної функції розподілу частинок за розмірами в металодіелектричних системах. Порівняльний аналіз результатів модельних розрахунків з експериментальними даними показав, що застосування вдосконалених експериментально-аналітичних методів, які враховують статистику розподілу нанорозмірних частинок за розмірами в наноструктурній системі дозволило підвищити точність одержаних експериментальних значень електромагнітних параметрів нанорозмірних частинок в статистично неоднорідній системі.

**У третьому розділі** наведені методики технологічних процесів формування металодіелектричних систем (нанорозмірних металевих компонент, діелектричних шарів) та результати їх комплексних досліджень. Вибір досліджуваних матеріалів,



матеріалу підкладки (покривне скло, плавлений кварц, монокристалічний кремній, поліровані металеві пластини), методів формування і досліджень зразків був обумовлений як фундаментальними та прикладними завданнями застосування металодіелектричних систем, так і специфікою методик експериментальних досліджень. З метою визначення електромагнітних параметрів нанорозмірних компонент в наноструктурних системах за допомогою експериментально-аналітичного підходу в рамках блоку експериментального забезпечення виготовлені серії експериментальних зразків на основі досліджуваних металів (мідь, нікель, хром) на скляних і кварцових підкладках та проведені їх спектрофотометричні, мікроструктурні дослідження. Сформовані вимоги до технологічних процесів для формування металодіелектричних наноструктурних систем та нанорозмірних компонент. Обґрунтовано використання відповідних методів вакуумного осадження (магнетронного розпилення на постійному струмі, термічного випаровування) нанорозмірних шарів з різною структурою та морфологією.

Розглянуто результати електронно-мікроскопічних досліджень (просвічуюча та растрова електронна мікроскопія, дифракція електронів) морфологічної мікроструктури і фазового складу отриманих нанорозмірних плівок. Відзначено особливості мікроструктурних досліджень плівок міді, нікелю і хрому.

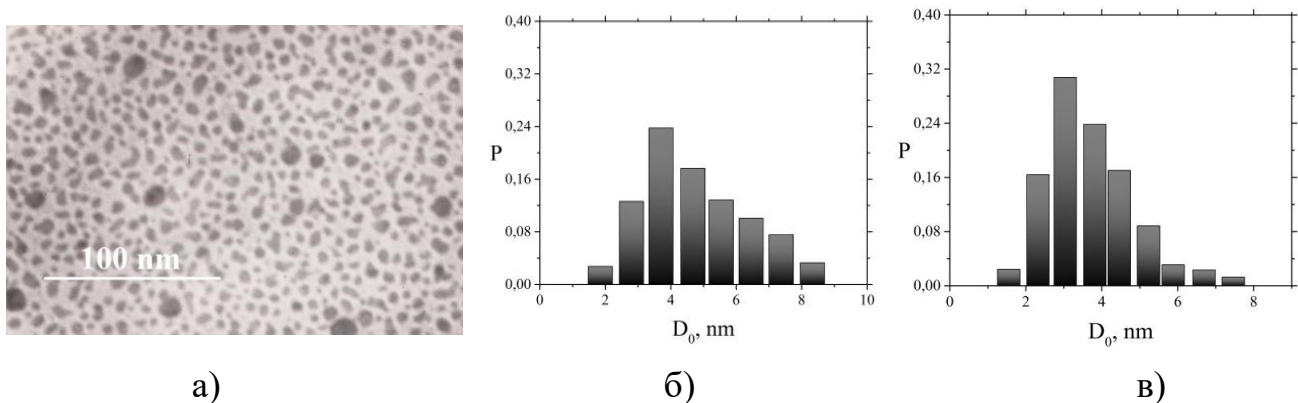


Рис. 5. Приклад - електронно-мікроскопічного знімку (а) та гістограма розподілу частинок за розміром (б) зразка острівцевої плівки міді на кварцовій підкладці з ваговою товщиною 1,5 нм; (в) зразка з ваговою товщиною 1,0 нм

Досліджено та визначено вплив параметрів технологічних режимів осадження нанорозмірних плівок на структурні, електрофізичні, оптичні властивості. Відзначено, що одними із основних чинників впливу на їх морфологічну структуру є потужність магнетронного розпилення, тиск в робочій камері, температура підкладки, додаткова термічна обробка. На підставі експериментальної інформації показано вплив на формування нанорозмірних плівок міді, нікелю, хрому підстилаючого діелектричного шару (підкладки). Встановлено, що острівцеві плівки на кварцових підкладках мають статистично неоднорідну структуру зі значною флуктуацією розмірів. При цьому статистично однорідна структура мала місце в острівцевих плівках на скляній підкладці з ваговою товщиною до 1 нм і низькою концентрацією наноострівців. Статистичний аналіз мікроструктури острівцевих плівок досліджуваних металів на різних діелектричних підкладках та технологічних режимах вакуумного осадження дозволив оцінити механізми формування

нанорозмірних плівок на різних стадіях росту і способи керування цим процесом з метою отримання наноструктурних середовищ з прогнозованими структурними параметрами шарів.

Наведені результати експериментальних спектрофотометричних досліджень (спектри пропускання  $T$  і відбивання  $R$ ) острівцевих плівок нікелю, міді і хрому в діапазоні спектру  $\lambda=0,2-1,1$  мкм.

Проведено аналіз особливостей спектральних залежностей  $T$  і  $R$  нанорозмірних плівок досліджуваних металів. Встановлено вплив мікроструктури нанорозмірних плівок міді на їх оптичні властивості та зміни в спектральних характеристиках. У разі нанорозмірних плівок нікелю і хрому з розміром частинок від 1 нм до 8 нм в межах спектрального інтервалу 0,2 - 1,1 мкм відмічено монотонний хід дисперсійних змін  $T$  та  $R$ . Зроблено висновок, що оптичні властивості нанорозмірних структур металів можна задавати шляхом зміни параметрів їх мікроструктури технологічними режимами їх формування.

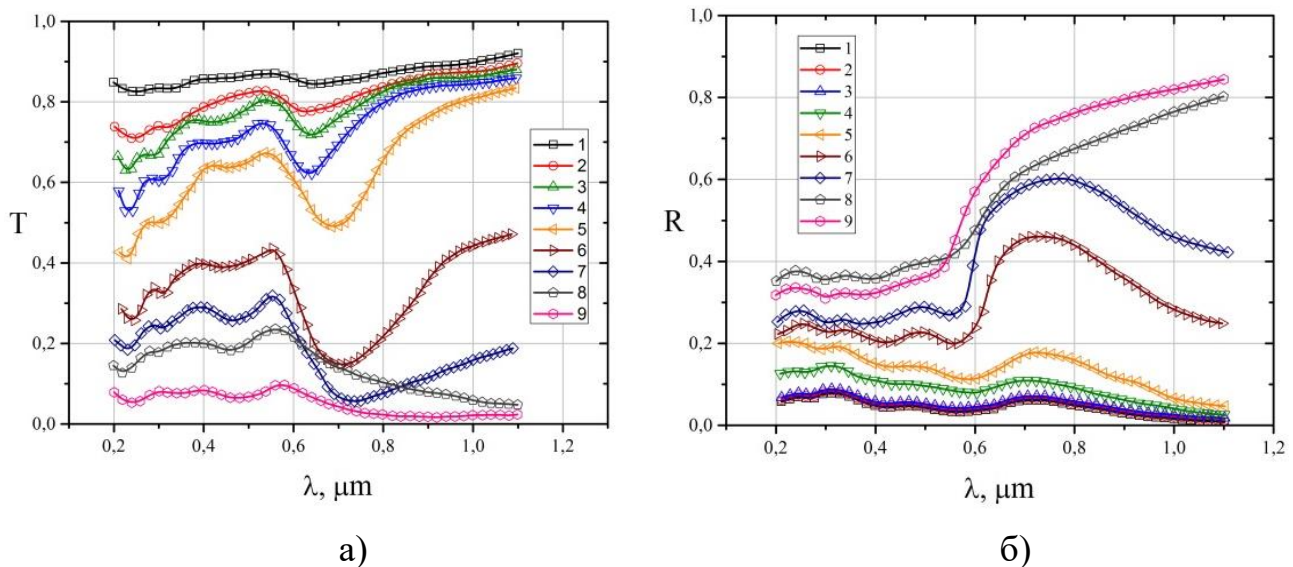


Рис. 6. Спектральні залежності коефіцієнта пропускання (а) і відбивання (б) нанорозмірних плівок міді на кварцових підкладках з ваговою товщиною: 1 - 1 нм; 2 - 1,5 нм; 3 - 1,7 нм; 4 - 2 нм; 5 - 3 нм; 6 - 11 нм; 7 - 18 нм; 8 - 28 нм; 9 - 65 нм

Важливим завданням прикладного використання, МДНС систем на основі нанорозмірних металевих частинок є забезпечення експлуатаційної стабільності, відповідно і її стійкості до дії зовнішніх чинників. Відомо, що стабільність таких структур визначається властивостями діелектричної компоненти (матриці). У зв'язку з цим увагу приділено всебічному дослідженню плівок оксинітриду алюмінію синтезованих методом магнетронного реактивного розпилення на постійному струмі на підкладках зі скла, кварцу і монокристалічного кремнію. Встановлено особливості спектральних і електрофізичних параметрів плівок. Методами інфрачервоної, Оже-спектроскопії та електронної мікроскопії, досліджено елементний і структурний склад синтезованих плівок. Проведені дослідження підтвердили високу хімічну стійкість та термічну стабільність плівок оксинітриду алюмінію на різнотипних підкладках. Досліджено вплив технологічних режимів синтезу плівок оксинітриду алюмінію методом магнетронного реактивного розпилення на їх фізико-хімічні параметри. Отримано рекомендації по режимах

синтезу плівок, які забезпечують оптимізацію електрофізичних параметрів на задані експлуатаційні властивості. На основі плівок оксинітриду алюмінію сформовано шаруваті металодіелектричні наноструктурні системи з нанорозмірними металевими компонентами для прикладного застосування в функціональних елементах енергозберігаючих технологій.

Таким чином, за допомогою комплексних досліджень встановлено, що одержані шаруваті металодіелектричні наноструктурні системи включають шари, які представляють собою нанокомпозитну структуру з неоднорідним розподілом нанорозмірних включень металу в діелектричній компоненті. Проведені дослідження дозволяють стверджувати, що мікроструктура та властивості компонент таких композитів визначаються технологічними умовами процесу їх одержання, що надає можливість фізично обґрунтовано встановлювати технологічні параметри процесів формування наноструктурних систем в цілому та відкриває можливість для прогнозованого регулювання їх електромагнітних властивостей для використання в якості функціональних елементів.

Наведено результати експериментальних досліджень металодіелектричних композитів типу метал-полімер. Обґрунтовано вибір складових компонентів композитів (полімерного середовища, металевого нанодисперсного наповнювача). В якості металевої фракції використано нікель та полімеру – епоксидна смола. Описано спосіб отримання зразків і досліджено їх мікроструктуру, склад методами електронної мікроскопії та рентгеноструктурного аналізу. Досліджено діелектричні спектри, спектри провідності металодіелектричних матеріалів в діапазоні частот  $1-10^{10}$  Гц та дисперсійні залежності комплексної магнітної проникності в діапазоні частот  $10^6-3 \cdot 10^9$  Гц). Отримані експериментальні результати показали, що діелектричні та магнітні параметри досліджених композитів суттєво змінюються при зміні концентрації металевої фази, що дає можливість отримувати матеріали з заданими властивостями. Наявність в наноструктурних метал-полімерних матеріалах діелектричних та магнітних втрат, обумовлених дисперсією комплексної діелектричної та магнітної проникності в НВЧ діапазоні, дає підставу для застосування таких матеріалів в елементах поглинання та екранування електромагнітної енергії. Для моделювання експлуатаційних характеристик та прогнозування можливостей прикладного застосування таких композитів встановлено апроксимаційні моделі експериментально одержаних дисперсійних та концентраційних залежностей ефективних комплексних діелектричної та магнітної проникності реальних нанокомпозитних структур нікель-полімер.

**У четвертому розділі** викладено результати експериментальних досліджень на основі експериментально-аналітичного підходу за допомогою розроблених експериментально-аналітичних методів спектральних та розмірних залежностей дійсної  $\alpha_1$  і уявної  $\alpha_2$  частин питомої комплексної електричної поляризованості нанорозмірних частинок міді, нікелю та хрому в металодіелектричних системах в системах з неоднорідним розподілом частинок за розмірами (острівцева плівка металу на кварцовій підкладці) в спектральному діапазоні 0,2 – 1.1 мкм при кімнатній температурі.

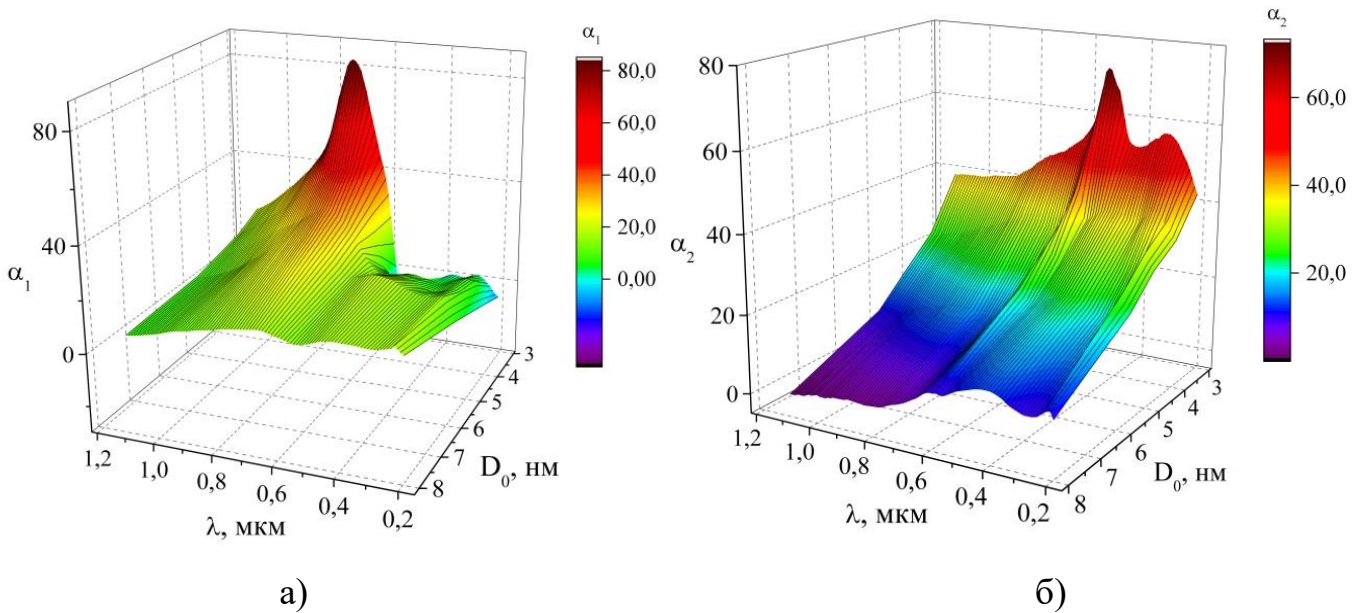


Рис. 7. Спектральні залежності дійсної (а) та уявної (б) частин комплексної питомої електричної поляризованості нанорозмірних частинок міді (острівцева плівка міді на кварцовій підкладці) при різних значеннях розміру  $D_0$  частинок

На основі отриманих експериментальних  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  частинок проведена оцінка значень їх дійсної  $\varepsilon_1$  та уявної  $\varepsilon_2$  частин комплексної діелектричної проникності та показника заломлення і поглинання. Розраховані значення оптичних параметрів для модельної сферичної частинки, з властивостями характерними для макроскопічних об'ємів (за даними показника заломлення  $n$  та поглинання  $k$  в макроскопічному об'ємі) металів.

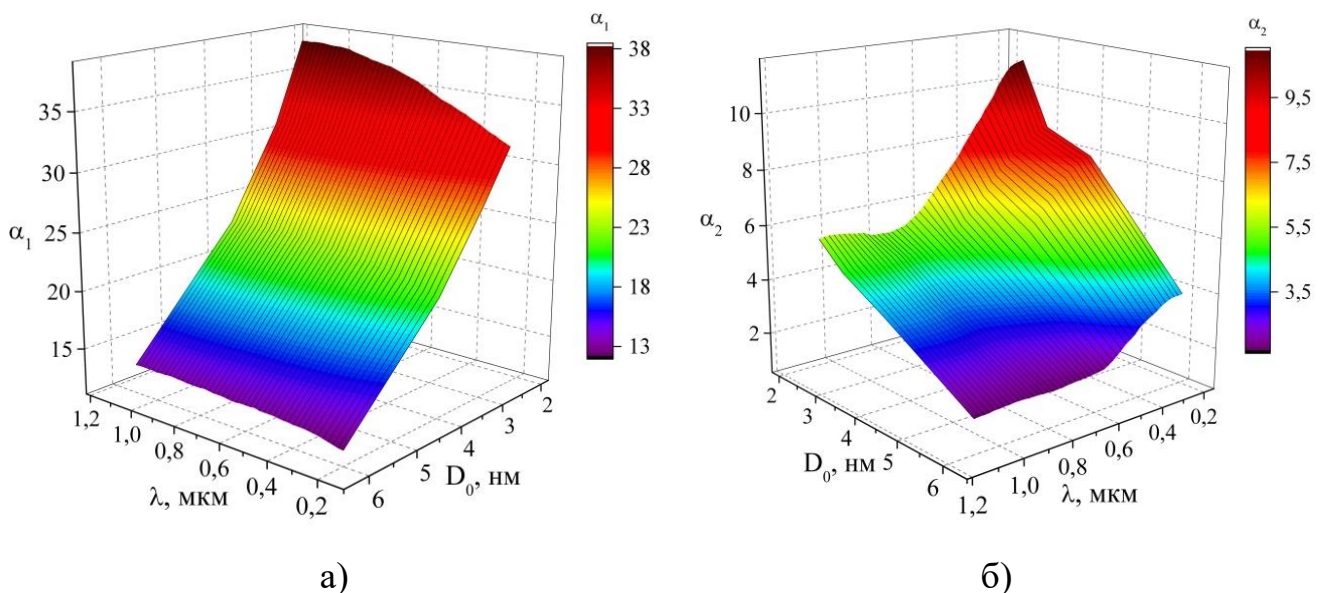


Рис. 8. Спектральні залежності дійсної (а) та уявної (б) частин питомої комплексної електричної поляризованості нанорозмірних частинок хрому (острівцева плівка хрому на кварцовій підкладці) при різних значеннях розміру  $D_0$  частинок



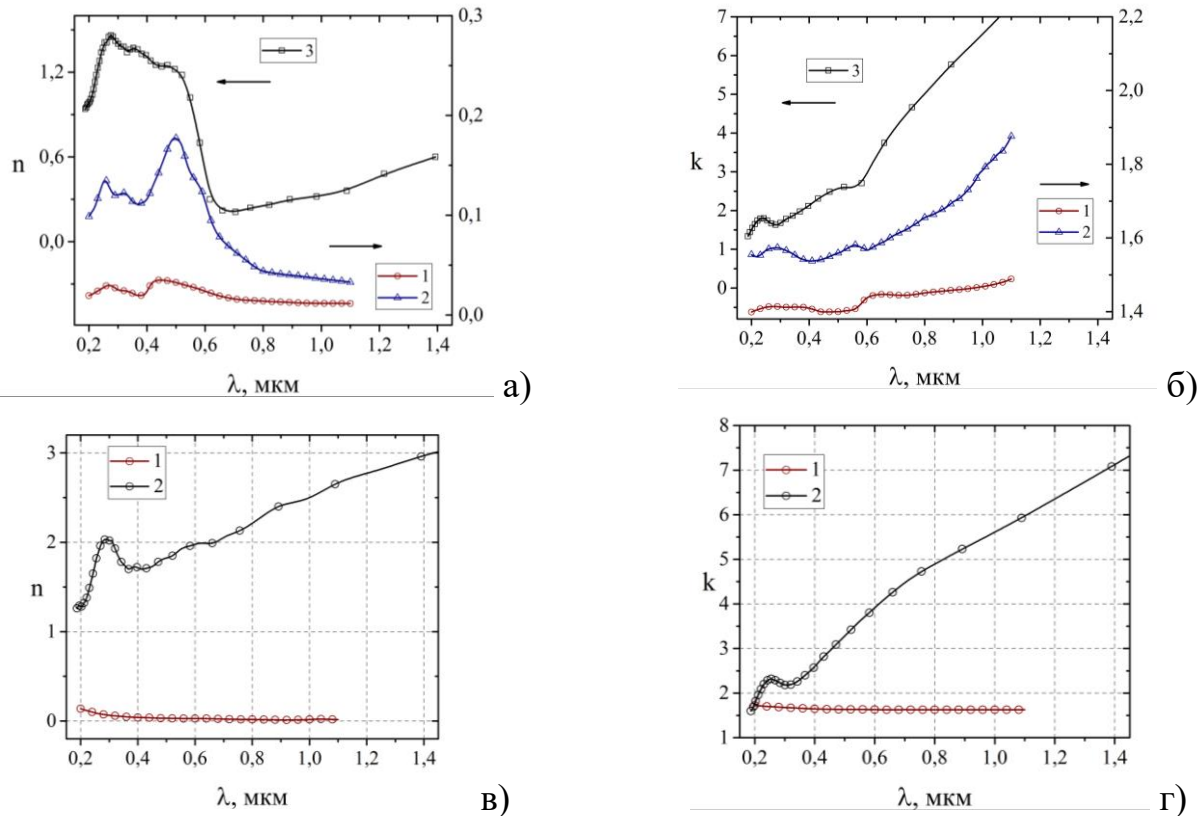


Рис. 9. Спектральні залежності показника заломлення  $n$  та поглинання  $k$  нанорозмірних частинок міді (а), (б): 1 – експериментальна для частинок з розміром  $D_0 = 3$  нм, 2 –  $D_0 = 8$  нм, 3 – міді в макроскопічних об'ємах; нікелю (в), (г) 1 – експериментальна  $D_0 = 7$  нм, 2 – нікелю в макроскопічних об'ємах

Проведені дослідження дозволяють встановити наступні особливості спектральних та розмірних характеристик оптичних параметрів нанорозмірних частинок досліджуваних металів, а саме:

- зростання до двох порядків величини значень дійсної та уявної частин питомої комплексної електричної поляризованості нанорозмірних частинок міді, нікелю та хрому зі зменшенням їх розміру;
- зменшення значень абсолютних величин дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності нанорозмірних частинок міді, нікелю та хрому при зменшенні об'єму частинки;
- дисперсійні залежності оптичних параметрів досліджуваних нанорозмірних частинок якісно узгоджуються в ближній ультрафіолетовій, видимій області спектру з відповідними залежностями для макроскопічних об'ємів металів;
- зміни в експериментальних дисперсійних залежностях електричної поляризованості нанорозмірних частинок нікелю та хрому носять монотонний характер;
- в спектральних залежностях комплексної електричної поляризованості нанорозмірних частинок міді в інтервалі довжин хвиль  $0,2 - 1,1$  мкм спостерігається ряд смуг (біля  $0,6$  мкм,  $0,31 - 0,47$  мкм та  $0,25$  мкм);
- водночас положення максимуму смуги в області довжин хвиль біля  $0,6$  мкм зміщується у блакитну область спектру, тоді як пік в області  $0,25$  мкм зміщується в

сторону більших  $\lambda$  з одночасним зростанням інтенсивності цих піків при зменшенні розміру частинок міді від 8 нм до 3,2 нм.

Встановлені експериментальні залежності електромагнітних параметрів нанорозмірних компонент міді, нікелю та хрому апроксимовані відповідними аналітичними виразами в досліджуваному інтервалі розмірів і частотному діапазоні, що визначають експериментально визначені особливості їх оптичних властивостей. Для прикладу,  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  для нанорозмірних частинок нікелю описано функціями (змінні  $\lambda$  задано в мкм,  $D_0$  – в нм):

$$\alpha_1 = 30,01 + 30,18\lambda - 2,13D_0 - 17,76\lambda^2 - 0,38D_0^2,$$

$$\alpha_2 = 0,21 + 37,52 \exp\left\{-\frac{\lambda}{0,56} - \frac{D_0}{4,14}\right\},$$

Коефіцієнт детермінації ( $\bar{z}$ ) для апроксимаційної моделі  $\alpha_1$  має значення  $\bar{z} \geq 0,928$ , а для  $\alpha_2$   $\bar{z} \geq 0,979$  в досліджуваних інтервалах змінних  $\lambda$ ,  $D_0$ . Встановлені аналітичні вирази представляють практичний інтерес та використані для моделювання та оптимізації наноструктурних систем (у складі яких є досліджені метали) та функціональних елементів на їх основі.

Встановлені закономірності в спектральних та розмірних залежностях оптичних параметрів нанорозмірних частинок міді, нікелю та хрому узгоджується з висновками та результатами відомих досліджень для благородних металів (срібло, золото).

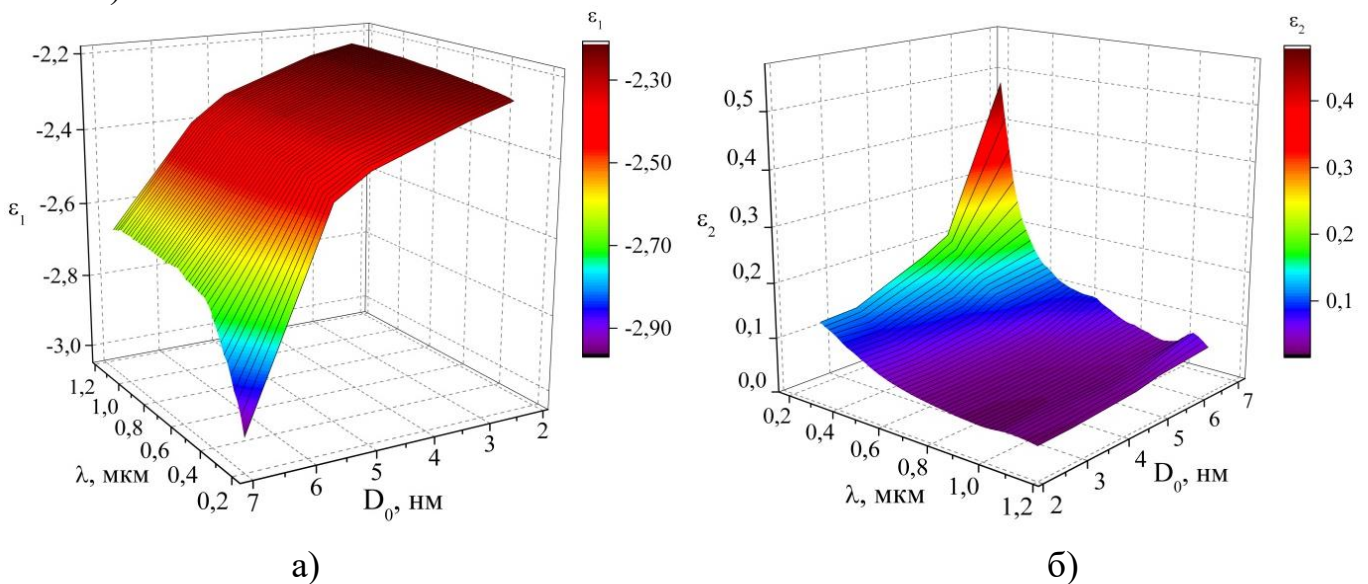


Рис. 10. Спектральні залежності дійсної (а) та уявної (б) частин комплексної діелектричної проникності нікелю (острівцева плівка нікелю на кварцовій підкладці) при різних значеннях розміру  $D_0$  частинок

Аналіз мікроструктури досліджуваних металодіелектричних систем вказує на формування в них проміжних шарів наноструктурних композитів типу  $Ni - AlxNyOz$ ,  $Cr - AlxNyOz$  та  $Cu - AlxNyOz$  з неоднорідним розподілом металевих включень. Експериментально показано вплив на оптичні властивості в шаруватих металодіелектричних системах проміжних нанокompозитних шарів, які виникають в процесі формування.

**П'ятий розділ** присвячено розгляду особливостей явища аномального поглинання нанорозмірних металевих частинок, які мають важливе значення для практичного застосування в металодіелектричних систем.

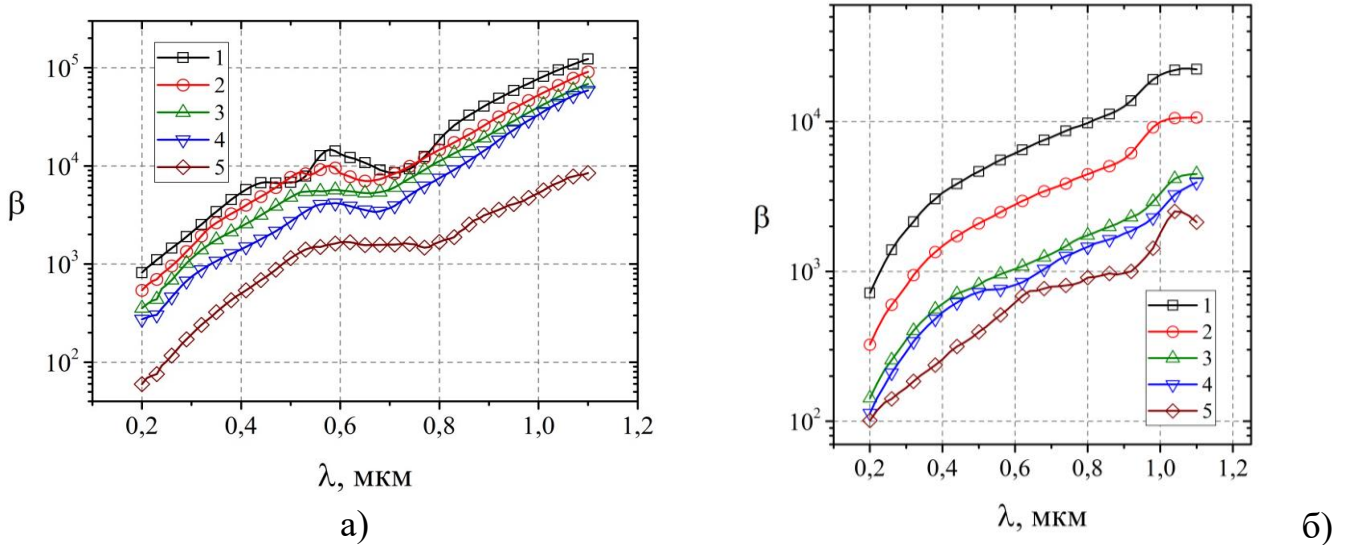


Рис. 11. Спектральні залежності питомого поглинання при різних значеннях розміру  $D_0$  частинок металу (а) міді 1 –  $D_0 = 3,2$  нм; 2 –  $D_0 = 4$  нм; 3 –  $D_0 = 4,8$  нм; 4 –  $D_0 = 5,6$  нм; 5 –  $D_0 = 8$  нм; (б) нікелю 1 –  $D_0 = 3,4$  нм; 2 –  $D_0 = 4$  нм; 3 –  $D_0 = 5$  нм; 4 –  $D_0 = 5,6$  нм; 5 –  $D_0 = 7$  нм

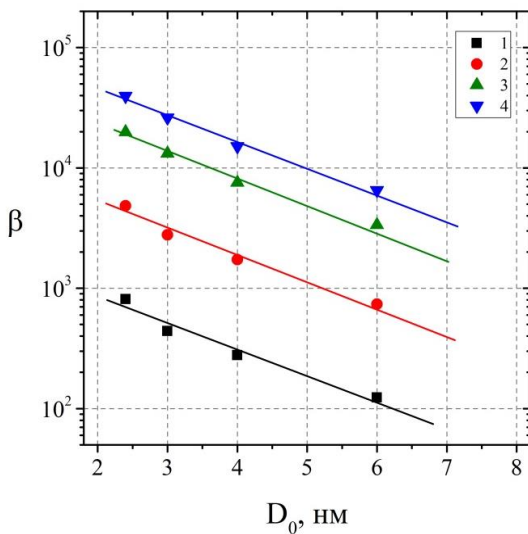


Рис. 12. Розмірні залежності питомого поглинання сферичних частинок хрому при різних значеннях довжини хвилі ЕМ випромінювання  $\lambda$ : 1 – 0,2 мкм, 2 – 0,4 мкм, 3 – 0,8 мкм, 4 – 1 мкм

розміру частинок в межах від 8 до 2 нм;

– для нанорозмірних частинок з розмірами від 2 до 8 нм основний вклад в зростання  $\beta$  вносить ефект поглинання ( $K_n \sim 10^0 \div 10^{-1}$ ) при низькому впливу ефекту розсіювання ( $K_p \sim 10^{-2} \div 10^{-6}$ );

На основі результатів експериментальних досліджень  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  нанорозмірних частинок міді, хрому, нікелю визначено їх значення  $\sigma$ , питомого поглинання  $\beta$  та факторів ефективності поглинання  $K_n$  та розсіювання  $K_p$ . У випадку нанорозмірних частинок нікелю та хрому, дисперсійні зміни  $K_n$ ,  $K_p$  в досліджуваній області спектру носять монотонний характер.

Результати досліджень щодо впливу розміру нанорозмірних частинок міді, нікелю та хрому на процеси фотопоглинання в спектральному діапазоні  $\lambda = 0,2 \div 1,1$  мкм, дозволяють стверджувати:

– збільшення значень  $K_n$ ,  $\beta$  до одного порядку величини при зменшенні

– значення  $\beta$  частинок досліджуваних металів корелюють з  $\beta$  для частинок золота та на два порядки величини перевершують  $\beta$  частинок срібла при відповідних значеннях  $\lambda$  і розмірах частинок.

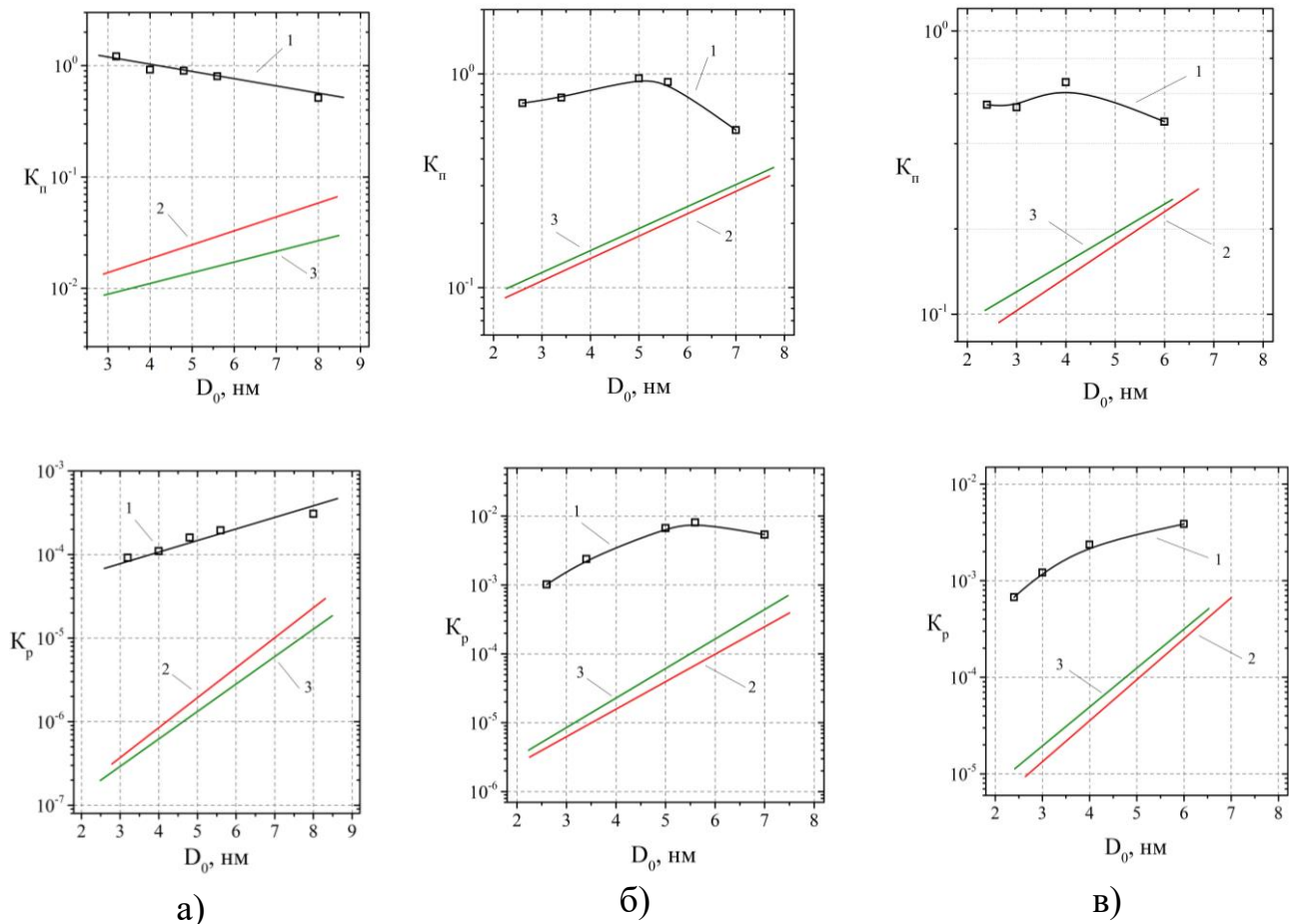


Рис. 13. Розмірні залежності факторів ефективності поглинання  $K_n$  та розсіювання  $K_p$  (1 – експериментальна; 2 – результати розрахунків по теорії класичного розмірного ефекту; 3 – результати розрахунків по теорії квантового розмірного ефекту): (а) - нанорозмірних частинок міді для  $\lambda=0,6$  мкм; (б) - нікелю для  $\lambda=0,2$  мкм; (в) хрому для  $\lambda=0,2$  мкм

Для дослідження природи розмірних залежностей електромагнітних параметрів нанорозмірних частинок в оптичному діапазоні спектра виконано модельні розрахунки за відомими теоріями класичного і квантового розмірних ефектів та проведено порівняльний аналіз розмірних залежностей електромагнітних параметрів з експериментальними результатами, а також з відповідними характеристиками для матеріалів у макроскопічних об'єктах.

Встановлено, що:

– для частинок досліджуваних металів з розміром менше 10 нм (в системі острівцева плівка на кварцовій підкладці) умови дипольного поверхневого плазмового резонансу в експериментальних спектральних залежностях комплексної діелектричної проникності в досліджуваному діапазоні спектру не реалізуються;



– розмірні залежності ЕМ параметрів цих частинок не можуть бути пояснені виключно класичним або квантовим розмірним ефектом в дипольному резонансі частинки;

– в поглинанні зовнішнього оптичного випромінювання суттєвий домінуючий вплив відіграє поверхня частинки з зменшенням її об'єму, зокрема посилення локального внутрішнього електричного поля в приповерхневій області частинки.

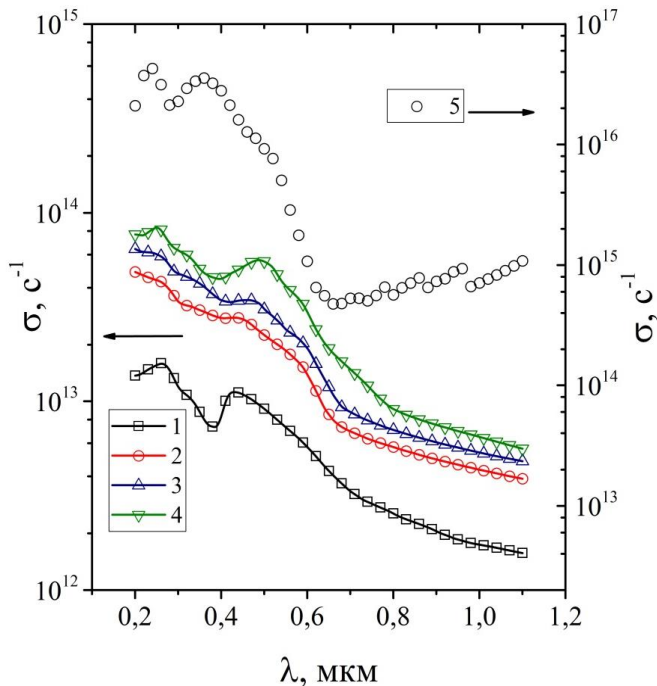


Рис. 14. Спектральні залежності оптичної електронної провідності нанорозмірних частинок міді при різних значеннях їх розміру  $D_0$ : 1 –  $D_0=3$  нм; 2 –  $D_0=4$  нм; 3 –  $D_0=5$  нм; 4 –  $D_0=8$  нм; 5 – для зразка міді в макроскопічному об'ємі

Представлено результати досліджень особливостей високочастотної провідності (в діапазоні  $\hbar\omega = 1,1\div 6,2$  еВ) нанорозмірних частинок нікелю, міді та хрому в системах з неоднорідним розподілом частинок за розмірами. Встановлено, що значення  $\sigma$  досліджуваних частинок діаметром менше 10 нм падають зі зменшенням їх розміру до двох порядків величини. Зіставлення отриманих значень  $\sigma$  частинок в межах розглянутого інтервалу розмірів зі значеннями  $\sigma$  макроскопічних об'ємів відповідних металів показує, що в частинках значення  $\sigma$  на 2 порядки величини менше, ніж в макроскопічних об'ємах матеріалів. В дисперсійних залежностях  $\sigma$  частинок відтворюються (по числу і близько по положенню їх в спектрі) усі властиві металам в макроскопічних об'ємах смуги міжзонного поглинання.

Показано, що на відміну від зразків металу в макроскопічних об'ємах, в яких  $\sigma$  зростає при зменшенні  $\hbar\omega$  в ближній інфрачервоній області спектру (за областю міжзонних переходів), в нанорозмірних частинках зі зменшенням  $\hbar\omega$  значення оптичної провідності падають, тобто механізм провідності "друдівського" типу в ближній інфрачервоній області спектра придушений.

Разом з тим слід звернути увагу на те, що в частотному діапазоні міжзонного поглинання на спектральних характеристиках електронної провідності, а також комплексної діелектричної проникливості досліджуваних нанорозмірних металевих частинок відтворюються властиві відповідним металам у макроскопічних об'ємах смуги міжзонного поглинання. Це свідчить про те, що зонна електронна структура в нанорозмірних частинках зберігається, хоча і в розмірно-трансформованому вигляді, та обумовлює специфіку електромагнітного відгуку частинок в оптичному діапазоні спектру.

Наведено результати досліджень електронних властивостей та нанорозмірних компонент досліджуваних нами металів. Проведена ідентифікація смуг експериментальних дисперсійних залежностей електромагнітних параметрів досліджених нанорозмірних частинок міді в області міжзонних переходів в наближенні псевдопотенціалу.

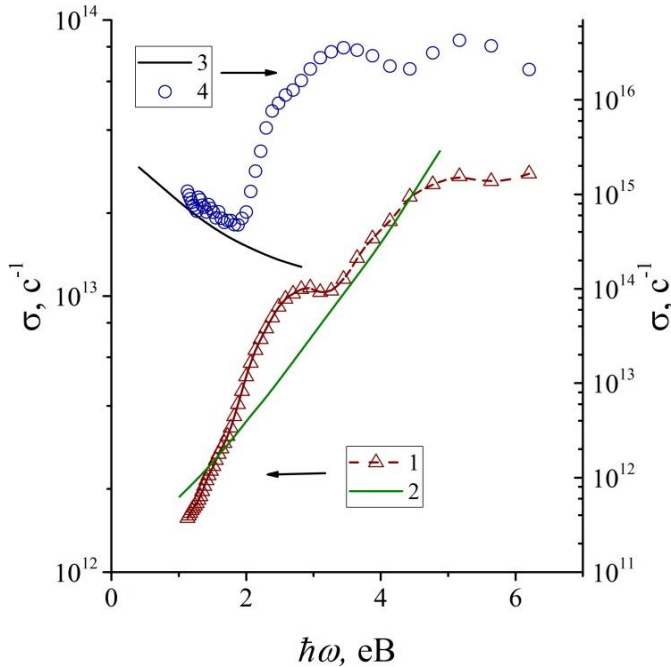


Рис. 15. Дисперсійні залежності оптичної електронної провідності нанорозмірних частинок міді розміром  $D_0 = 4$  нм: 1 – експериментальна залежність; 2 – результати розрахунків по апроксимаційним співвідношенням; 3 – результати розрахунків по моделі класичного розмірного ефекту на основі теорії вільних електронів; 4 – для зразка міді в макроскопічному об'ємі

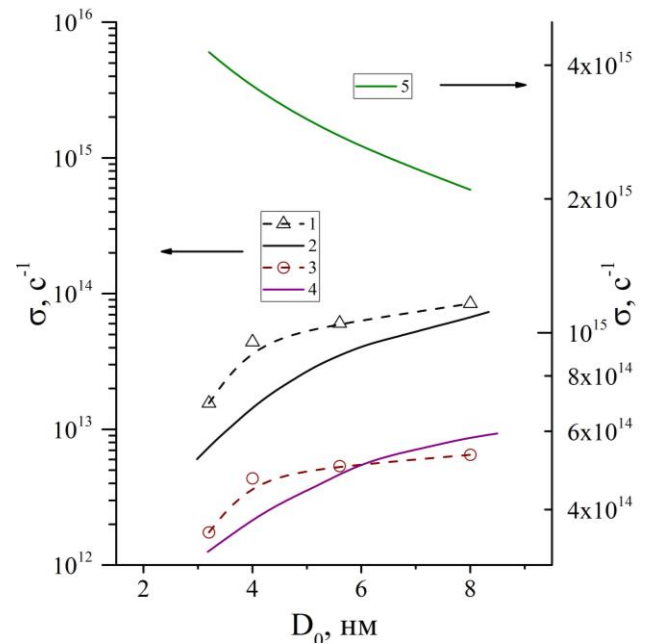


Рис. 16. Розмірні залежності оптичної електронної провідності нанорозмірних частинок міді : для  $\hbar\omega = 5.0$  eV (1, 2) и  $\hbar\omega = 1.24$  eV (3, 4, 5): 1,3 – експериментальна залежність; 2,4 – результати розрахунків на основі апроксимаційної моделі; 5 – результати розрахунків по моделі класичного розмірного ефекту на основі теорії вільних електронів

Встановлено, що смуга локалізована поблизу області 5 eV в дисперсійних залежностях електромагнітних характеристик ( $\alpha$ ,  $\epsilon$ ) нанорозмірних частинок міді обумовлена міжзонними переходами електронів, пов'язаними з розщеплюванням енергії поблизу бреггівської площини {200}. Зміщення положення максимуму цієї смуги у блакитну область спектру, при зменшенні розміру частинок міді пов'язано з впливом розмірних змін Фур'є-компонент їх псевдопотенціалу. Визначено на основі експериментальних досліджень значення Фур'є-компонент псевдопотенціалу (поблизу бреггівської площини {200}) нанорозмірних частинок міді та їх зростання з зменшенням розміру частинок.

Запропоновано аналітичну модель оптичної провідності та фотопоглинання нанорозмірних металевих частинок на довгохвильовому краю області їх міжзонного поглинання з врахуванням аналізу розмірної трансформації електронної та фононної

системи на основі результатів їх експериментальних досліджень. Для випадку сферичної частинки:

$$\sigma = \frac{\sqrt{3}}{2\pi^{5/2}} \frac{\omega^4}{c^3} \frac{\sqrt{a}}{\varphi} \left(\frac{D_0}{2}\right)^{\frac{5}{2}} \exp \left[ \frac{2}{5} \varphi \left( \frac{2|V_g| - \hbar\omega}{k_B T_{Дмас} \left(1 - \frac{a}{D_0}\right)} \right)^{\frac{1}{2}} \right],$$

де  $T_{Дмас}$  – температури Дебая металу в макроскопічному об'ємі;  $a$  – постійна кристалічної ґратки;  $\varphi$  – параметр  $V_g$  – Фур'є-компонента псевдопотенціалу частинки металу;  $k_B$  – постійна Больцмана.

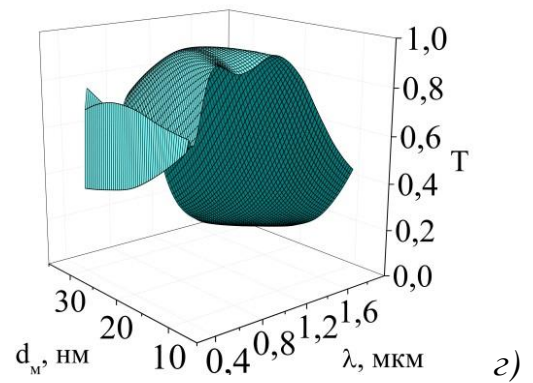
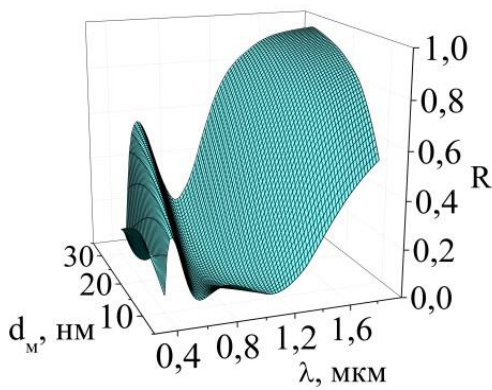
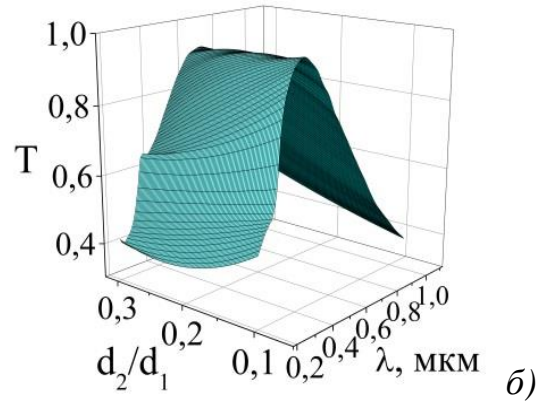
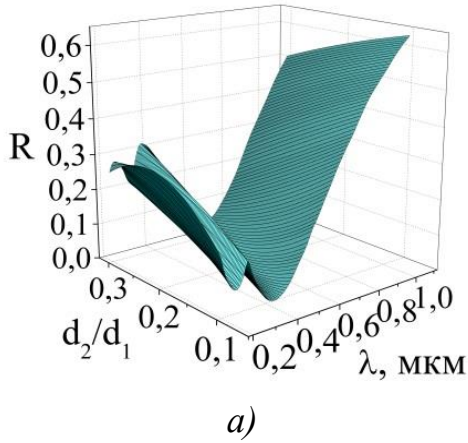
Порівняння результатів розрахунків на основі апроксимаційної моделі  $\sigma$ ,  $\beta$  з відповідними експериментальними результатами показує, що для нанорозмірних частинок міді вони якісно та кількісно корелюють між собою.

**У шостому розділі** розглянуто практичні аспекти застосування наноструктурних металодіелектричних систем в функціональних елементах. А саме: оптичних фільтрів на основі дво-, трьохшарових покриттів з нанорозмірних шарів металів (міді, хрому, нікелю) та плівок типу оксинітриду алюмінію для застосування в пристроях електроніки та енергозберігаючих технологіях; екрануючих захисних покриттів, зокрема які екранують електромагнітне випромінювання радіочастотного, ультрафіолетового, інфрачервоного діапазону спектру з вікном прозорості у видимому діапазоні.

З метою формування наноструктурних матеріалів з прогнозованими електромагнітними властивостями для вирішення прикладних завдань, встановлено вплив структурних параметрів, морфології компонентів металодіелектричних систем та проміжних нанокомпозитних шарів, на спектрально-селективні характеристики електромагнітних параметрів досліджуваних структур. Проведено чисельне моделювання спектральних характеристик ефективної комплексної діелектричної проникності наноструктурних систем  $Cu - Al_xN_yO_z$ ,  $Ni - Al_xN_yO_z$ ,  $Cr - Cr_2O_3$ . Моделювання виконано з врахуванням реальних значень електромагнітних параметрів нанорозмірних компонент, визначених на основі експериментально-аналітичного підходу. На основі інтегральних оптичних параметрів  $T$  та  $R$  сформовано критерії ефективності оптичних фільтрів з енергозберігаючими властивостями, що дозволяє проводити оптимізацію їх спектральних характеристик та інтегральних параметрів (зокрема, візуальний показник –  $T_{63}$  і  $R_{63}$ , випромінююча здатність –  $E$ , інтегральна спрямована поглинаюча здатність щодо сонячного спектра –  $A_N$ , параметр селективності  $\eta$ ) на забезпечення максимальної ефективності з точки зору енергозбереження.

Приведено результати експериментальних досліджень впливу технологічних режимів формування металодіелектричних систем на селективно-оптичні параметри. Проведені дослідження підтвердили високу стійкість покриттів на основі оксинітриду алюмінію на різнотипних підкладках до дії різних зовнішніх середовищ. Дані рекомендації по вибору матеріалів та структурних параметрів для створення селективних металодіелектричних систем на основі нанорозмірних

компонентів. Приводяться експлуатаційні характеристики розроблених функціональних елементів та показано їх перевагу (технологічні, економічні, експлуатаційні) до традиційних. Показано, що розроблені металодіелектричні системи можуть ефективно використовуватися в енергозберігаючих технологіях в якості низькоемісійних і рефлекторних елементів та в фототермічних перетворювачах.



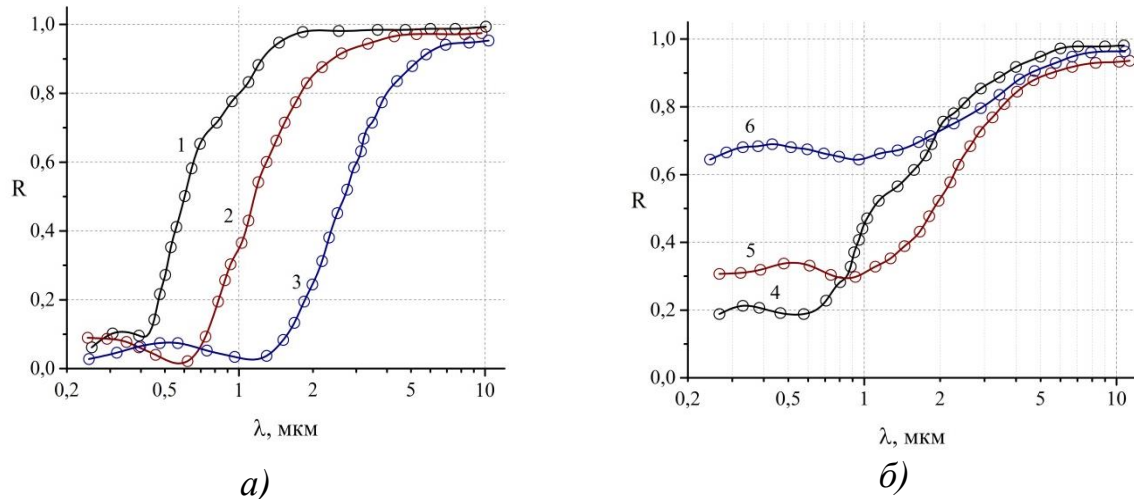
Тип структури	$R_{\text{сз}}$	$T_{\text{сз}}$	$E$
	Граничні значення параметрів		
	0 – 0,5	0,5 - 0,99	0,02 – 0,25
$Al_xO_yN_z - Cr / Cu / Cr - Al_xO_yN_z$ 50 нм / 15 нм / 50 нм	0,140	0,413	0,042
$Al_xO_yN_z - Cr / Cu / Cr - Al_xO_yN_z$ 30 нм / 6 нм / 30 нм	0,090	0,692	0,071

е)

Рис. 17. Приклади селективних елементів на основі металодіелектричних наноструктур (а)-(г) – спектральні залежності коефіцієнтів відбивання  $R$  та пропускання  $T$  структур типу  $Al_xN_yO_z - Cr / - Cu - Cr / - Al_xN_yO_z$  при різних значеннях структурних параметрів; (е) – структурна схема; (е) – значення інтегральних селективних параметрів

Проведено мо делювання ефективності екранування плівкових структур з вікном прозорості у видимому діапазоні спектру в залежності від їх конструктивних

параметрів та наноструктурних матеріалів метал-полімер. Виготовлені експериментальні зразки електромагнітних екранів на основі перфорованих металевих і металодіелектричних покриттів. Проведено комплексне експериментальне дослідження тестових зразків. Представлено аналіз експериментальних і теоретичних досліджень.



Структура покриття	Товщина, нм	$R_a$ , мкм	$A_N$	$E_N$	$\eta$
$Cr-Cr_2O_3$	4.0	0.125	0.51	0.03	17.0
$Cr-Cr_2O_3$	44.0	0.125	0.91	0.04	22.7
$Cr-Al_xO_yN_z$	1.5/60	0.125	0.64	0.03	21.3
$Al_xO_yN_z-Cr-Al_xO_yN_z$	50/2/50	0.125	0.89	0.04	22.3
$Cr-Cr_2O_3$	8.0	2.0	0.93	0.30	2.8
$Cr-Al_xO_yN_z$	1/80	2.0	0.93	0.32	2.9

в)

Рис. 18. Приклади спектральних залежностей коефіцієнтів відбивання  $R$  металодіелектричних наноструктур  $Cr-Cr_2O_3$  (а),  $Cr-Al_xO_yN_z$  (б) на мідній основі: 1 – 4.0 нм; 2 – 3.0 нм; 3 – 44.0 нм; 4 – 1.5/60 нм; 5 – 50/2/50 нм; (б) – для модельної структури з властивостями хрому в макроскопічних об'ємах; (в) значення інтегральних селективних параметрів

За встановленими технологічними рекомендаціями, що базувалися на результатах представлених в роботі досліджень металодіелектричних систем з нанорозмірною металевою фазою розроблено технологічні процеси для малосерійного виробництва функціональних елементів на об'ємних та плоских підкладках на базі модернізованого технологічного вакуумного обладнання УВМ-15. Зокрема, на підставі експериментальної інформації про залежності між оптичними характеристиками і структурними параметрами металодіелектричних шарів та їх нанорозмірних компонент встановлено технологічні параметри процесу синтезу плівкових покриттів для використання в якості енергоефективних структур із заданими спектральними характеристиками.



Таким чином, одержанні результати передбачають можливість оптимізації та керованого формування наноструктурних металодіелектричних систем з необхідною структурою, обумовленою параметрами технологічних режимів, і, відповідно, прогнозованими оптичними характеристиками.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розвинуто експериментально-аналітичний підхід та розроблено методологічне забезпечення оцінки електромагнітних параметрів, проведені комплексні дослідження металодіелектричних систем на основі нанорозмірних структур металів з урахуванням їх неоднорідності та розмірного фактору. Таким чином комплексно забезпечено розв'язок важливої науково-прикладної проблеми розробки методів для оцінки, дослідження і аналізу особливостей зміни електромагнітних властивостей матеріалів в нанорозмірних об'ємах та створення функціональних елементів з прогнозованим комплексом електромагнітних параметрів на основі наноструктурних металодіелектричних систем.

Отримано такі основні результати:

1. Одержав подальший розвиток експериментально-аналітичний підхід до аналізу та оцінки електромагнітних параметрів нанорозмірних компонент в наноструктурних металодіелектричних системах з різною структурою та морфологією. Встановлено класифікацію та критерії для систематизації реальних металодіелектричних наноструктурних систем (двовимірних, трьохвимірних). Розвинуто та вдосконалено теоретичні моделі електромагнітного відгуку двовірної та трьохвимірної металодіелектричних наноструктурних систем із статистично неоднорідною структурою шляхом врахування статистичного аналізу функції розподілу нанорозмірних частинок в системі за розмірами. Моделі встановлюють зв'язок електромагнітних параметрів нанорозмірних компонентів системи та їх мікроструктурних морфологічних параметрів з відгуком системи на електромагнітне збурення. Запропоновані моделі дозволяють відобразити вплив неоднорідності по розмірам нанорозмірних включень в металодіелектричній системі на її електромагнітний відгук, підвищити узгодження експериментальних результатів з розрахунковими та використані для оцінки електромагнітних параметрів нанорозмірних компонент в металодіелектричних системах.

2. Проведено експериментальні комплексні дослідження нанорозмірних плівок міді, нікелю, хрому, діелектричних шарів на основі оксинітриду алюмінію, а також метал-полімерних композитних наноструктур сформованих методами товстоплівкової технології. На основі експериментальних досліджень встановлено вплив на оптичні властивості нанорозмірних шарів металів в шаруватих металодіелектричних системах морфологічної мікроструктури оточуючих шарів та проміжних нанокомпозитних шарів, які виникають в процесі формування металодіелектричних систем. Показано, що наприклад для шаруватих систем  $AlxNyOz - Ni - Cu - Ni - AlxNyOz$  мають місце наноструктурні металодіелектричні композити типу  $Ni - AlxNyOz$ ,  $Cu - AlxNyOz$  з неоднорідним розподілом металевих включень. Одержанні результати передбачають можливість керованого формування наноструктурних металодіелектричних систем з необхідною структурою,

обумовленою параметрами технологічних режимів, і, відповідно, прогнозованим комплексом оптичних характеристик.

3. Обґрунтовано та створено ряд експериментально-аналітичних методів визначення електромагнітних параметрів нанорозмірних частинок з урахуванням їх статистики розподілу по розмірах (в діапазоні до 100 нм) в двовимірних (моношарах наночастинок) і тривимірних металодіелектричних наноструктурних системах. Удосконалено та апробовано експериментально-аналітичний метод визначення експериментальних значень питомої комплексної поляризованості нанорозмірних частинок в системах зі статистично неоднорідною структурою по спектрофотометричним і електронно-мікроскопічним дослідженням двовимірних металодіелектричних наноструктурних системах шляхом урахування аналізу функції розподілу частинок за розмірами. Показано, що застосування запропонованого методу в системах зі статистично неоднорідною структурою з урахуванням реальної функції розподілу частинок за розмірами дозволило підвищити точність оцінки експериментальних значень електромагнітних параметрів в порівнянні з відомими.

4. Розроблено експериментально-аналітичні методи визначення електромагнітних параметрів нанорозмірних частинок по спектроскопічним та структурним дослідженням тривимірних одношарових та багатошарових системах на основі розв'язку зворотних задач, зокрема модифікованої теорії Бруггемана. Запропоновані методи відрізняються врахуванням морфології, структури композитних систем, статистики розподілу нанорозмірних частинок за розміром в неоднорідній системі та забезпечують можливість одержати достовірні дані про електромагнітні властивості нанорозмірних частинок в складі композитних систем зі статистично неоднорідним розподілом частинок за розміром.

5. На основі запропонованих експериментально-аналітичних методів визначені експериментальні значення електромагнітних параметрів (дійсна  $\alpha_1$  і уявна  $\alpha_2$  частина питомої комплексної електричної поляризованості, дійсна  $\varepsilon_1$  та уявна  $\varepsilon_2$  частина комплексної діелектричної проникності та показник заломлення і поглинання) нанорозмірних частинок міді, нікелю і хрому в системах зі статистично неоднорідною структурою та встановлено характер їх змін в інтервалі розмірів частинок від 1 нм до 10 нм у ближньому УФ, видимому, ближньому ІЧ діапазоні спектру, що використано при розробці металодіелектричних наноструктур.

6. Отримано аналітичні спектральні та розмірні залежності питомої комплексної електричної поляризованості та комплексної діелектричної проникності нанорозмірних частинок міді, нікелю та хрому в досліджуваному інтервалі розмірів і спектральному діапазоні від 0,2 до 1,1 мкм, що визначають експериментально встановлені особливості їх оптичних властивостей. Ці результати використані для моделювання та оптимізації наноструктурних композитних систем та функціональних елементів на їх основі.

7. Експериментально встановлено для нанорозмірних частинок міді, нікелю і хрому в системах зі статистично неоднорідною структурою збільшення значень дійсної та уявної частин питомої комплексної поляризованості, параметрів поглинання і водночас зниження значень їх комплексної діелектричної проникності, електронної провідності до двох порядків величини при зменшенні

розміру частинок та в порівнянні з значеннями відповідних металів у макроскопічних об'ємах спектральному діапазоні від 0,2 до 1,1 мкм. Виявлено, що в досліджуваних нанорозмірних частинках на відміну від металів у макроскопічних об'ємах поглинання в ближній інфрачервоній області спектра обумовлене внутрішньозонними переходами електронів провідності значно послаблене. Зокрема, кількісно (по порядку величини) встановлені значення електронної провідності частинок нікелю, хрому, міді близькі між собою і міра спаду  $\sigma$  зі зменшенням розміру слабо залежить від типу металу, що враховано під час створення селективних елементів на їх основі.

8. Показано, що експериментально встановлені розмірні залежності електромагнітних параметрів досліджених нанорозмірних частинок міді з розміром менше 10 нм не можуть бути обумовлені виключно уявленнями теорій класичного або квантового розмірних ефектів в дипольному наближенні. На основі аналізу теоретичних та експериментальних електромагнітних характеристик підтверджено, що в нанорозмірних частинках міді (благородних металах) з розміром менше 10 нм не проявляється поверхневий плазмовий дипольний резонанс в їх оптичних властивостях. Проведена ідентифікація смуг експериментальних дисперсійних залежностей електромагнітних параметрів досліджених нанорозмірних частинок в області міжзонних переходів в наближенні псевдопотенціалу. Встановлено експериментальні значення Фур'є-компонент псевдопотенціалу (поблизу брегівської площини  $\{200\}$ ) нанорозмірних частинок міді та їх зростання з зменшенням розміру частинок, що дозволило оцінити їх параметри фотопоглинання.

9. Запропоновано аналітичну модель оптичної провідності та фотопоглинання нанорозмірних металевих частинок на довгохвильовому краю області їх міжзонного поглинання з врахуванням розмірної трансформації електронної та фононної системи з залученням апроксимаційних розмірних залежностей Фур'є-компонент псевдопотенціалу, температури Дебая, що можуть бути використані для оцінки критичного значення розміру частинки, при якому можуть проявлятися розмірні зміни їх електромагнітних параметрів.

10. На основі оксинітриду алюмінію і нанорозмірних шарів міді створено селективні елементи з енергозберігаючими властивостями, для яких значення інтегральних візуальних показників пропускної здатності  $T_{\text{вз}}$  становить 0,69, а інтегральної випромінюючої здатності  $E$  0,048. Розроблено рекомендації по створенню екрануючих покриттів на основі плівкових металодіелектричних наноструктур та структур полімер-метал.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Machulianskyi, O. V. "Optical properties of nickel nanoparticles in systems with a statistically inhomogeneous structure." *Microsystems, Electronics and Acoustics* 23.1 (2018): 6-15. (INDEX COPERNICUS, GOOGLE SCHOLAR)
2. Machulianskyi, O. V. "Specific electric polarizability of copper nanoparticles in the optical range of the spectrum." *Microsystems, Electronics and Acoustics* 23.2 (2018): 1-9. (INDEX COPERNICUS, GOOGLE SCHOLAR)



3. Bovtun, V., M. Kempa, D. Nuzhnyy, J. Petzelt, O. Borisova, O. Machulianskyi, and Y. Yakymenko. "Composition dependent microwave properties of dielectric-conductor nanocomposites." *Phase Transitions* 91.9-10 (2018): 1027-1035. (SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
4. Machulianskyi, Oleksandr, Bohdan Babych, and Viktor Machulianskyi. "Determination of the efficiency factors of the absorption and scattering of nickel nanoparticles." *Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska* 8.1 (2018): 4-7. (INDEX COPERNICUS, GOOGLE SCHOLAR)
5. Machulianskyi, O. "Optical characteristics of nanodimensional particles of chrome." *Herald of Khmelnytskyi national university. Technical sciences* 257.1 (2018): 203-207. (INDEX COPERNICUS, GOOGLE SCHOLAR)
6. Bovtun, V., M. Kempa, D. Nuzhnyy, J. Petzelt, O. Borisova, O. Machulianskyi, and Y. Yakymenko. "Microwave absorbing and shielding properties of inhomogeneous conductors and high-loss dielectrics." *Ferroelectrics* 532.1 (2018): 57-66. (SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
7. Мачулянський, А. В., Б. Б. Бабыч, и В. А. Мачулянський. "Математическое моделирование многофункциональных покрытий." *Вісник Херсонського національного технічного університету* 1.3(62) (2017): 192-196. (НАЦІОНАЛЬНА БІБЛІОТЕКА ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО, GOOGLE SCHOLAR, РИНЦ)
8. Machulianskyi, O. V., B. B. Babych, and V. O. Machulianskyi. "Modeling of an electromagnetic response of single-layer nanocomposite coatings." *Visnyk of Kherson National Technical University* 1.3(66) (2018): 104-108. (НАЦІОНАЛЬНА БІБЛІОТЕКА ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО, GOOGLE SCHOLAR, РИНЦ)
9. Мачулянський, О. В., Б. Б. Бабыч, В. О. Мачулянський, та Н. П. Тарасовська. "Моделювання наноструктурних металодіелектричних систем для використання в якості оптичних фільтрів." *Вісник Херсонського національного технічного університету* 1.3(58) (2016): 371-375. (НАЦІОНАЛЬНА БІБЛІОТЕКА ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО, GOOGLE SCHOLAR, РИНЦ)
10. Мачулянский, О. В., Ю. М. Шварц, М. М. Шварц, та П. О. Яганов. "Моделювання термометричної характеристики діодних сенсорів в умовах радіаційного опромінення." *Електроніка та зв'язок* 4 (2006): 5- 8. (INDEX COPERNICUS)
11. Дидковский, В. С., А. В. Мачулянский, В. В. Пилинский, В. А. Попов, М. В. Родионова, и В. Б. Швайченко. "Перспективы применения наноструктурных материалов для электромагнитного экранирования." *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Силовая електроніка та енергоефективність"* 3 (2008): 39-42. (GOOGLE SCHOLAR)
12. Борисова, А. В., В. Г. Вербицкий, А. В. Мачулянский, и М. К. Родионов. "Разработка металлодиэлектрических структур с энергосберегающими свойствами на основе алюминия." *Восточно-Европейский журнал передовых технологий* 6.9(72) (2014): 43-47. (INDEX COPERNICUS, GOOGLE SCHOLAR)
13. Лапчинский, В. И., А. В. Мачулянский, Д. Д. Татарчук, и Т. Л. Волхова. "Металлодиэлектрические нанокомпозитные структуры." *Електроніка та зв'язок. Тематичний випуск "Електроніка та нанотехнології"* 1 (2011): 20-22. (INDEX COPERNICUS)

14. Borisova, A., A. Machulyansky, M. Rodionov, V. Smilyk, and Y. Yakimenko. "Aluminum oxynitride dielectric films prepared by reactive sputtering." *Electronics and Communications* 20.3(86) (2015): 31-36. (INDEX COPERNICUS, GOOGLE SCHOLAR)
15. Мачулянский, А. В., В. В. Пилинский, О. В. Теличкина, М. В. Родионова, и В. Б. Швайченко. "Основы применения наноструктурных материалов для обеспечения электромагнитной совместимости электронных устройств." *Електроніка та зв'язок. Тематичний випуск "Електроніка та нанотехнології"* 3 (2010): 9-15. (INDEX COPERNICUS, GOOGLE SCHOLAR)
16. Мачулянский, А. В., Д. Д. Татарчук, О. В. Теличкина, и Т. Л. Волхова. "Диэлектрические характеристики композиционных материалов на основе углерода." *Електроніка та зв'язок. Тематичний випуск "Електроніка та нанотехнології"* 2 (2011): 39-41. (INDEX COPERNICUS)
17. Мачулянський, О. В., М. В. Родіонова, В. В. Пілінський, та В. Б. Швайченко. "Застосування наноподібних структур для розв'язку задач забезпечення електромагнітної сумісності." *Електроніка та зв'язок. Тематичний випуск "Електроніка та нанотехнології"* 4 (2011): 6-10. (INDEX COPERNICUS)
18. Мачулянский, А. В., В. А. Мачулянский, В. В. Пилинский, и О. В. Теличкина. "Моделирование структур для информационных и телекоммуникационных систем." *Електроніка та зв'язок* 5 (2011): 82-85. (INDEX COPERNICUS, GOOGLE SCHOLAR)
19. Machulyansky, A., A. Borisova, and Y. Yakimenko. "Analysis of metal-dielectric nanocomposite coatings with ferromagnetic inclusions for electromagnetic protection of electronic devices." *Electronics and Communications* 19.4(81) (2014): 23-27. (INDEX COPERNICUS, GOOGLE SCHOLAR)
20. Мачулянский, А. В. "Электромагнитные характеристики нанокомпозитов на основе наноразмерных металлических включений." *Технічна електродинаміка* 2 (2012): 193-197. (GOOGLE SCHOLAR)
21. Мачулянский, А. В., Д. Д. Татарчук, и В. А. Мачулянский. "Анализ СВЧ-свойств нанодисперсных композитных систем." *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Силовая електроніка та енергоефективність"* 1 (2010): 303-304. (GOOGLE SCHOLAR)
22. Machulansky, A., and B. Babych. "Selective energy-saving metal-dielectric nanocomposite coatings based on copper." *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка* 1/2.21/22 (2014): 74-78. (GOOGLE SCHOLAR)
23. Мачулянский, А. В., В. А. Попов, В. В. Пилинский, Д. Д. Татарчук, и В. Б. Швайченко. "Экранирование электромагнитного поля покрытиями на основе ультрадисперсных структур." *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Силовая електроніка та енергоефективність"* 5 (2009): 23-25. (GOOGLE SCHOLAR)
24. Machulansky, A., and B. Babych. "Dielectric-metal composites with dispersed inclusions of cooper for microwave range devices." *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка* 1.23 (2015): 55-57. (GOOGLE SCHOLAR)

25. Machulianskyi, O. V., B. B. Babych, and V. O. Machulianskyi. "Approximation models of functional systems with nanocomposite components." *Visnyk of Kherson National Technical University* 3.2(69) (2019): 145-150. (НАЦІОНАЛЬНА БІБЛІОТЕКА ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО, GOOGLE SCHOLAR, РИНЦ)
26. Мачулянський, О. В., Д. Д. Татарчук, та Д. А. Шмигін. "Селективні пристрої НВЧ на основі неоднорідних структур." *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електроніки"* 3 (2010): 159-160.
27. Мачулянский, А. В., В. В. Пилинский, В. А. Мачулянский, О. В. Теличкина, и В. Б. Швайченко. "Численное моделирование эффективности экранирования электромагнитного поля однослойными нанодисперсными структурами." *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Силовая електроніка та енергоефективність"* 2 (2010): 293-296.
28. Мачулянский, А. В. "Высоочастотная проводимость наноразмерных металлических частиц." *Электроника и связь. Тематический выпуск "Проблемы электроники"* 1 (2007): 41-45.
29. Мачулянский, А. В., и др. "Применение наноструктурных материалов для улучшения теплоотвода в устройствах силовой электроники." *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Силовая електроніка та енергоефективність"* 3 (2006): 27-29.
30. Мачулянский, А. В., и В. А. Попов. "Терморегулирующие покрытия в устройствах силовой электроники." *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електроніки"* 5 (2006): 87-88.
31. Мачулянский, А. В., В. В. Пилинский, Д. Д. Татарчук, и В. Б. Швайченко. "Возможности повышения эффективности экранирования электромагнитного поля наноструктурными материалами." *Технічна електродинаміка* 1 (2011): 350-353.
32. Борисова, А. В., А. В. Мачулянский, Д. Д. Татарчук, и Ю. И. Якименко. "Влияние структуры и состава полимеруглеродных нанокомпозитов на их электромагнитные свойства." *Технічна електродинаміка* 1 (2011): 332-335.
33. Machulianskyi, O., B. Babych, and V. Machulianskyi. "Optical filters on the basis of composite nanodimensional structures." *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка* 1.25 (2017): 34-37. (GOOGLE SCHOLAR)
34. Патент на корисну модель № 97514 Україна. Нанокомпозитні структури з заданими характеристиками для використання як багатофункціональних енергозберігаючих світлопрозорих покриттів / Борисова О. В., Мачулянський О. В., Родіонов М. К., Якименко Ю. І. // № u201406267. Опубл. 25.03.2015 р., бюл. № 6, МПК G02B 5/20 (2006.01).
35. Патент на корисну модель № 108530 Україна. Композитні металодіелектричні поглинаючі структури для захисту від нвч випромінювання в широкому діапазоні частот / Борисова О. В., Вербицький В. Г., Мачулянський О. В., Родіонов М. К. // № u201512686. Опубл. 25.07.2016 р., бюл. № 14, МПК G12B 17/00 (2016.01).
36. Bovtun, V., A. Borisova, M. Kempa, A. Machulyansky, D. Nuzhnyy, M. Savinov, J. Petzelt, and Y. Yakymenko. *Broadband dielectric spectra and microwave absorbing/shielding efficiency of dielectric-conductor nanocomposites*, Proceedings of the

- 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen, 19-24 July 2015. (WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
37. Borisova, A., A. Machulyansky, Y. Yakimenko, V. Bovtun, M. Kempa, and M. Savinov. *Microwave dielectric, magnetic and shielding properties of composites of metal nanoparticles and epoxy resin*, Proceedings of the IEEE Progress in Electromagnetics Research Symposium, Stockholm, 12-15 August 2013. (WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
38. Borisova, A., A. Machulyansky, Y. Yakimenko, V. Bovtun, M. Kempa, and M. Savinov. *Broadband dielectric and conductivity spectra of dielectric-metal nanocomposites for microwave applications*, Proceedings of the IEEE 33rd International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 16-19 April 2013. (SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
39. Borisova, A., A. Machulyansky, M. Rodionov, Y. Yakimenko, V. Bovtun, M. Kempa, and B. Bondar. *Conductivity of metal (Al, Cu)-dielectric composites and modeling of the single- and multi-layer composite coatings for microwave applications*, Proceedings of the IEEE 34th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 16-19 April 2014. (SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
40. Borisova, A., A. Machulyansky, Y. Yakimenko, V. Bovtun, M. Kempa, M. Savinov and B. Bondar. *Modeling of metal-dielectric nanocomposite coatings with ferromagnetic inclusions for ensuring electromagnetic protection of electronic devices*, Proceedings of the IEEE 34th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 16-19 April 2014. (SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
41. Borisova, A., A. Machulyansky, M. Rodionov, Y. Yakimenko, and B. Babych. *Properties of aluminum oxynitride films prepared by reactive magnetron sputtering*, Proceedings of the IEEE 34th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 16-19 April 2014. (WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
42. Borisova, A., A. Machulyansky, M. Rodionov, V. Verbitskiy, Y. Yakimenko, and B. Babych. *Energy-efficient optically transparent coating based on a metal-dielectric composites*, Proceedings of the IEEE 35th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 21-24 April 2015. (SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
43. Borisova, A., B. Babych, A. Machulyansky, V. Verbitskiy, and Y. Yakimenko. *Dimensional dependencies of optical parameters of nanodimensional metal particles*, Proceedings of the IEEE 36th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 19-21 April 2016. (SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
44. Babych, B., A. Borisova, A. Machulyansky, V. Machulyansky, M. Rodionov, Y. Yakimenko. *Film coatings that are transparent in the visible spectral region with shielding properties in the microwave range*, Proceedings of the IEEE 37th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 18-20 April 2017. (SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
45. Babych, B., O. Borisova, O. Machulianskyi, M. Rodionov, V. Verbitskiy, and V. Machulianskyi ; Y. Yakymenko. *Investigation of the structure and optical properties of thin copper films*, Proceedings of the IEEE 38th International Scientific Conference

"Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 24-26 April 2018. (SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)

46. Babych, B., O. Borisova, O. Machulianskyi, M. Rodionov, D. Koroliouk, V. Machulianskyi, and Y. Yakymenko. *Applications of metal-dielectric nanocomposite structures in information systems*, Proceedings of the IEEE 38th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 24-26 April 2018. (SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)

47. Babych, B., Y. Yakymenko, M. Rodionov, O. Machulianskyi, and V. Seker. *Infrared spectra of metal-dielectric nanostructured phosphate class complexes*, Proceedings of the IEEE 39th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 16-18 April 2019. (SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)

48. Диденко, Ю. В., А. В. Мачулянский, Д. Д. Татарчук, О. В. Теличкина, и Ю. И. Якименко. *СВЧ-характеристики металлодиэлектрических нанокomпозитных материалов*, Материалы 20-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, 13-17 сентября 2010 г. (SCOPUS, GOOGLE SCHOLAR)

49. Борисова, А. В., А. В. Мачулянский, Д. Д. Татарчук, и Ю. И. Якименко. *Нанокomпозитные материалы полимер-углерод*, Материалы 21-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, 12-16 сентября 2011 г. (SCOPUS, GOOGLE SCHOLAR)

50. Бондарь, Б. М., А. В. Борисова, А. В. Мачулянский, и Ю. И. Якименко. *Характеристики радиопоглощающих композитных покрытий на основе нанодисперсных частиц*, Материалы 22-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, 12-14 сентября 2012 г. (SCOPUS, GOOGLE SCHOLAR)

51. Борисова А. В., В. П. Бовтун, А. В. Мачулянский, М. Кемпа, и Ю. И. Якименко. *Электродинамические характеристики нанокomпозитов металл-диэлектрик с ферромагнитными включениями*, Материалы 23-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, 12-14 сентября 2013 г. (SCOPUS, GOOGLE SCHOLAR)

52. Telychkina, O., A. Machulyansky, D. Tatarchuk, and Y. Yakimenko. *Nanocomposite materials on the base of polymer-carbon*, Proceedings of the 34th International Spring Seminar on Electronics Technology, Tatra, 11-15 May 2011. (SCOPUS, WEB OF SCIENCE)

53. Machulyansky, A., D. Tatarchuk, O. Telychkina, and Y. Yakimenko. *Electrophysical properties of nanocomposite materials on the base of structures metal-dielectric*, Proceedings of the 33rd International Spring Seminar on Electronics Technology, Warsaw, 12-16 May 2010. (WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)

54. Machulyansky, A., D. Tatarchuk, and Y. Yakimenko. *The layered nanocomposite coatings for protecting electronic devices from electromagnetic radiation*, Proceedings of the 35th International Spring Seminar on Electronics Technology, Bad Aussee, 9-13 May 2012. (SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)

55. Machulyanskij, A., M. Lortkipanidze, I. Kulbachka, N. Matveeva, and M. Fadiev. *Electrophysical properties of dielectrics based on rare-earth metals for MOS structures*,

Proceedings of the IEEE 31st International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 10-13 April 2012.

*Здобувачем проведено аналіз та узагальнення отриманих результатів.*

56. Machulyanskiy, A. V., V. V. Pilinsky, V. B. Shvaichenko, and Sh. Shalileh. *Increasing effectiveness of electronic equipment shielding by nanostructural composite materials*, Proceedings of the IEEE 31st International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 10-13 April 2012.

57. Machuliansky, A., V. Pilinsky, O. Telychkina, M. Rodionova, Z. Joskiewicz, and T. Wieckowski. *Application of nanostructured materials ensuring the electromagnetic compatibility of power electronic*, Proceedings of the International Symposium EMC Europe 2010, Wroclaw, 13-17 September 2010.

58. Мачулянский, А. В., О. В. Теличкина, и В. А. Мачулянский. *Анализ эффективности применения наноструктурных систем для защиты информации от утечки по техническим каналам*, Материалы 12-й Международной научно-технической конференции SAIT 2010, Киев, 25-29 мая 2010 г.

59. Диденко, Ю. В., А. В. Мачулянский, В. А. Мачулянский, Д. Д. Татарчук, и Ю. И. Якименко. *Защитные материалы СВЧ-диапазона на основе нанодисперсных структур металл-диэлектрик*, Материалы 6-й Международной научно-технической конференции "Современные информационно-коммуникационные технологии", Ливадия, 4-8 октября 2010 г.

60. Мачулянский, А. В., В. В. Пилинский, В. А. Мачулянский, О. В. Теличкина, и В. Б. Швайченко. *Модель наноструктурного электромагнитного экрана*, Материалы 6-й Международной научно-технической конференции "Современные информационно-коммуникационные технологии", Ливадия, 4-8 октября 2010 г.

61. Борисова, А. В., Ю. В. Диденко, А. В. Мачулянский, Д. Д. Татарчук, и Ю. И. Якименко. *Диэлектрические свойства модифицированных кристаллов со структурой силленита*, Материалы 7-й Международной научно-технической конференции "Современные информационно-коммуникационные технологии", Ливадия, 4-8 октября 2011 г.

62. Борисова, А. В., Ю. В. Диденко, А. В. Мачулянский, Д. Д. Татарчук, и Ю. И. Якименко. *Термодиэлектрические свойства медьсодержащих нанокомпозитов*, Материалы 4-й Международной научной конференции "Функциональная база нанoeлектроники", Кацивели, 30 сентября - 3 октября 2011 г.

63. Борисова, А. В., Ю. В. Диденко, А. В. Мачулянский, Д. Д. Татарчук, и Ю. И. Якименко. *Наноструктурные композитные металл-диэлектрические материалы для СВЧ-приборов*, Материалы 7-й Международной научно-технической конференции "Современные информационно-коммуникационные технологии", Ливадия, 4-8 октября 2011 г.

64. Борисова, О. В., Б. Б. Бабич, В. Г. Вербицкий, О. В. Мачулянский, и В. О. Смілик. *Енергозберігаючі нанокомпозитні покриття на основі нікелю*, Матеріали 4-ї Міжнародної науково-практичної конференції "Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки", Чернівці, 23-25 жовтня 2014 р.

65. Борисова, О. В., В. Г. Вербицкий, А. В. Мачулянский, и М. К. Родионов. *Частотні характеристики комплексної діелектричної проникності метал-*

діелектричних композитів на основі немагнітних металів, Матеріали 8-ї Міжнародної наукової конференції "Функциональная база нанoeлектроники", Одеса, 14-18 вересня, 2015 р.

66. Мачулянський, О. В., та Б. Б. Бабич. *Оптичні характеристики нанодисперсних металодіелектричних плівок*, Матеріали 8-ї науково-практичної конференції "Перспективні напрямки сучасної електроніки", Київ, 14-15 травня 2014 р.

67. Machulyansky, A., and B. Babych. *Energy-saving nanocomposite coverings on the basis of copper*, Proceedings of the 10th International Conference "Electronics and applied physics", Kyiv, 22-25 October 2014.

68. Machulyansky, A., and B. Babych. *Dielectric-metal composites with dispersed inclusions of copper for microwave applications*, Proceedings of the 11th International Conference "Electronics and applied physics", Kyiv, 21-24 October 2015.

69. Machulyansky, A., B. Babych, and V. Machulyansky. *Cutting filters based on composite nanoscale structure*, Proceedings of the 12th International Conference "Electronics and applied physics", Kyiv, 19-21 October 2016.

70. Machulyansky, A., B. Babych, and V. Machulyansky. *Optical filters on the basis of composite systems with nanodimensional inclusions of metals*, Proceedings of the 13th International Conference "Electronics and applied physics", Kyiv, 24-27 October 2017.

71. Machulianskyi, O., B. Babych, and V. Machulianskyi. *Application of evolutionary algorithm for modeling and optimization of selective systems*, Proceedings of the 14th International Conference "Electronics and applied physics", Kyiv, 23-26 October 2018.

72. Мачулянський, О. В., Б. Б. Бабич, та В. О. Мачулянський. *Електродинамічне моделювання композитів на основі діелектричної матриці з включеннями феромагнітних металів*, Матеріали 5-ї Міжнародної науково-практичної конференції "Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах", Чернівці, 3-5 листопада 2016 р.

73. Мачулянский, А. В., Б. Б. Бабыч, и В. А. Мачулянський. *Математическое моделирование многофункциональных покрытий*, Матеріали 18-ї Міжнародної конференції з математичного моделювання, Херсон, 18-22 вересня 2017 р.

74. Machulianskyi, O. V., B. B. Babych, and V. O. Machulianskyi. *Modeling of an electromagnetic response of single-layer nanocomposite coatings*, Materials of 19th international conference of mathematical modelling is dedicated to 250 anniversary from the birthday Jean-Baptiste Joseph Fourier, Kherson, 17-21 September 2018.

75. Machulyansky, A., B. Babych, and V. Machulyansky. *Modelling of electromagnetic parameters of two-dimensional nanostructural system taking into account statistics of distribution of nanoparticles on the sizes*, Матеріали 9-ї Міжнародної наукової конференції "Функциональная база нанoeлектроники", Одеса, 18-23 вересня 2017.

76. Мачулянський, О. В., Б. Б. Бабич, та В. П. Секер. *Просвітлюючі покриття на основі наноструктурних металодіелектричних композитів*, Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції "Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка", Кременчук, 17-19 травня 2018 р.

77. Мачулянський, О. В., Б. Б. Бабич, та В. О. Мачулянський. *Визначення факторів ефективності поглинання та розсіювання наночастинок нікелю*, Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції I Міжнародний

симпозіум Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях, Чернівці, 9-11 листопада 2017 р.

78. Мачулянський, О. В. *Оптичні характеристики нанорозмірних частинок хрому*, Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції I Міжнародний симпозіум Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях, Чернівці, 9-11 листопада 2017 р.

79. Мачулянський, О. В., Б. Б. Бабич, В. О. Мачулянський, та Н. П. Тарасовська. *Моделювання наноструктурних металодіелектричних систем для використання в якості оптичних фільтрів*, Матеріали 17-ї Міжнародної конференції з математичного моделювання, Херсон, 10 вересня 2016 р.

80. Мачулянський, О. В., Б. Б. Бабич, та В. О. Мачулянський. *Селективні властивості нанокомпозитних металодіелектричних структур в оптичному діапазоні*, Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції "Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах", Чернівці, 8-10 листопада, 2018.

81. Machulianskyi O. V., B. B. Babych, and V. O. Machulianskyi. Approximation models of functional systems with nanocomposite components, Materials of 20th international conference of mathematical modelling, Kherson, 16-20 September 2019.

## АНОТАЦІЯ

**Мачулянський О.В. Наноструктурні металодіелектричні системи з прогнозованими електромагнітними характеристиками.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Міністерство освіти і науки України, Київ, 2020.

Дисертація присвячена питанням дослідження, розробки наноструктурних металодіелектричних систем та функціональних елементів на їх основі. Розроблено, обґрунтовано; експериментально-аналітичні методи визначення значень електромагнітних параметрів нанорозмірних частинок в системах з неоднорідним розподілом частинок за розмірами по спектроскопічним та структурним дослідженням одношарових та багатошарових систем. Визначені експериментальні значення електромагнітних параметрів нанорозмірних частинок міді, нікелю і хрому з розміром від 1 нм до 10 нм в системах зі статистично неоднорідною структурою в ближньому ультрафіолетовому, видимому, ближньому інфрачервоному діапазоні спектру та встановлено їх апроксимаційні моделі, що визначають експериментально встановлені особливості їх оптичних властивостей. Встановлено вплив структурних параметрів, морфології компонент металодіелектричних систем на їх електромагнітні властивості. Сформовано селективні елементи з енергозберігаючими, екрануючими властивостями

**Ключові слова:** нанорозмірні частинки, металодіелектричні системи, неоднорідність, експериментально-аналітичний метод, електрична поляризованість, діелектрична проникність, екрануючі покриття, енергоефективність.



## А Н Н О Т А Ц И Я

**Мачулянский А. В. Наноструктурные металлодиэлектрические системы с прогнозируемыми электромагнитными характеристиками.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Министерство образования и науки Украины, Киев, 2020.

Диссертация посвящена вопросам исследования, разработки наноструктурных металлодиэлектрических систем и функциональных элементов на их основе. Разработано, обоснованно экспериментально-аналитические методы определения значений электромагнитных параметров наноразмерных частиц в системах с неоднородным распределением частиц по размерам по спектроскопическим и структурным исследованиям однослойных и многослойных систем. Определены экспериментальные значения электромагнитных параметров наноразмерных частиц меди, никеля и хрома с размером от 1 нм до 10 нм в системах со статистически неоднородной структурой в ближнем ультрафиолетовом, видимом, ближнем инфракрасном диапазоне спектра и установлено их аппроксимационные модели, которые определяют экспериментально установленные особенности их оптических свойств. Установлено влияние структурных параметров, морфологии компонент металлодиэлектрических систем на их электромагнитные свойства. Сформированы селективные элементы с энергосберегающими, экранирующими свойствами.

**Ключевые слова:** наноразмерные частицы, металлодиэлектрические системы, неоднородность, экспериментально-аналитический метод, электрическая поляризуемость, диэлектрическая проницаемость, экранирующие покрытия, энергоэффективность.

## S U M M A R Y

**Machulianskyi O.V. Nanostructured metal-dielectric systems with predicted electromagnetic characteristics.** - Manuscript.

Dissertation for obtaining a scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.27.01 - solid state electronics. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», The Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

The thesis for doctoral degree is devoted to the issues of development and production of nanostructured composite metal-dielectric systems and creation of functional devices based on them. The research developed methodological, algorithmic support for evaluation and analysis of electromagnetic characteristics of nanostructural systems. The experimental-analytical approach to determination of experimental values of electromagnetic parameters of nanoscale particles in metal-dielectric nanostructural systems with different structure and morphology has been further developed. The theoretical models of electromagnetic response of two-dimensional and three-dimensional metal-dielectric nanostructured systems with statistically inhomogeneous structure have been developed and improved by taking into account the statistical analysis of the nanoscale particle distribution function in the system by size. The models establish

connection of electromagnetic characteristics of nanoscale components of the system and their microstructural morphological parameters with system response for electromagnetic perturbation. Experimental and analytical methods for determining the values of electromagnetic characteristics of nanosized particles in the systems with statistically inhomogeneous structure by the spectroscopic and structural studies of three-dimensional single-layer and multi-layer systems have been developed. The experimental values of electromagnetic parameters (complex specific electric polarizability, complex dielectric permittivity, refraction and absorption index) of copper, nickel and chromium nanosized particles with the size from 1 nm to 10 nm are determined in systems with a statistically inhomogeneous structure in the near ultraviolet, visible, near infrared ranges of the spectrum. The analytical asymptotic spectral and dimensional dependences of complex specific electric polarizability and complex dielectric permittivity of nanosized particles of the studied materials in the spectral range from 0.2 to 1.1  $\mu\text{m}$  are established, which confirms the experimentally established features of their optical properties. The increasing values of real and imaginary parts of complex specific polarizability, absorption parameters were experimentally established for copper, nickel and chromium nanosized particles with size less than 10 nm in systems with a statistically inhomogeneous structure. At the same time the reducing values of complex dielectric permittivity, electrical conductivity of such particles to two orders of magnitude with reduction of particle size and in comparison with values of corresponding metals in macroscopic volumes were established. It has been revealed that in the investigated nanoscale particles, in contrast to metals in macroscopic volumes, absorption in the near infrared range of the spectrum are caused by intra-zone transitions of electrons conduction and is significantly weakened. It has been established that the experimental dimensional dependences of the electromagnetic parameters of nanosized copper, nickel and chromium particles with the size of less than 10 nm cannot be conditioned solely by the use of theories of classical or quantum size effects in dipole approximation. It is confirmed on the basis of the analysis of theoretical and experimentally established electromagnetic characteristics that the surface plasma dipole resonance is not fulfilled for nanosized copper particles with a size less than 10 nm. The approximation model of optical conductivity and specific absorption in the range of their interband absorption is proposed taking into account the influence of particle size on the electronic and phonon states in it. The influence on the optical properties of nanoscale metal layers in layered metal-dielectric systems, the morphological microstructures of the surrounding layers and the intermediate nanocomposite layers that appear in the formation of MD systems is experimentally shown. New metal-dielectric composite systems based on aluminum oxynitride with nanoscale metal inclusions have been developed. Selective structures with energy-saving, shielding properties and improved performance have been formed. This has provided a comprehensive solution to an important scientific and applied problem of the development of functional devices with predictable dynamic electromagnetic characteristics based on nanostructured metal-dielectric systems with taking into account reliable information about the specifics of the electromagnetic properties of nanoscale components.

**Key words:** nanosized particles, metal-dielectric systems, inhomogeneous experimental-analytical method, electric polarizability, dielectric permittivity, shielding coating, energy efficiency.